

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. Ondřej Sušovský



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

KOOPERATIVNÍ MANIPULÁTOR

CONTROL OF COOPERATIVE MANIPULATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Sušovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Ondřej Sušovský

ID: 173751

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Kooperativní manipulátor

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se se způsoby řízení adaptivního(kooperativního) robota.
- 2) Ověřte předložené víceosé čidlo sil a momentů z hlediska možnosti použití pro kooperativní robotiku.
- 3) Navrhněte adaptivní algoritmus pro ovládání koncového efektoru s řízením vektoru působící síly.
- 4) Otestujte na konkrétní aplikaci (např. kreslení na papír se silovou kompenzací a bez ní) a zhodnoťte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

S. A. Schneider and R. H. Cannon, "Object impedance control for cooperative manipulation: theory and experimental results," in IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 8, no. 3, pp. 383-394, June 1992.

doi: 10.1109/70.143355

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 13.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jan Vašina, Ing. Antonín Šauer

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje problému adaptivního řízení kooperativního robotického manipulátoru. Pojednává o získávání a zpracování dat z šestiosého tenzometru a jejich použití pro adaptivní řízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kooperativní robot, Cobot, Tenzometr, Adaptivní řízení, Průmysl 4.0,

ABSTRACT

This thesis discusses adaptive control of cooperative robotic manipulator. It deals with gathering and processing of data from six degrees of freedom tensometer and their use in adaptive control.

KEYWORDS

Cooperative robot, Cobot, Tensometer, Adaptive control, Industry 4.0,

SUŠOVSKÝ, Ondřej. *Kooperativní manipulátor*. Brno, 2019, 81 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Kooperativní manipulátor“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svým konzultantům Ing. Antonínu Šauerovi a Ing. Janu Vašinovi za konzultace a podnětné návrhy k práci.

Dále bych rád poděkoval vedoucímu této práce, panu Ing. Lukáši Kopečnému, Ph.D a jednateři firmy TG Drives Ing. Richardu Chamrádovi za poskytnutí příležitosti tuto práci vypracovat.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	12
1 Kooperativní roboty	13
1.1 Druhy Kooperace	13
1.1.1 Bezpečnostní monitorované zastavení (Safety-Monitored stop)	13
1.1.2 Sledování rychlosti a vzdálenosti	14
1.1.3 Ruční navádění	15
1.1.4 Omezení síly a výkonu	16
1.2 Souřadné systémy	17
1.2.1 Rotace kolem jednotlivých os	17
2 Senzory síly a točivého momentu	19
2.1 Princip	19
2.1.1 Odporové tenzometry	19
2.2 Umístění senzorů	20
2.2.1 Před efektor	20
2.2.2 U každého kloubu	20
2.2.3 U každého kloubu a před efektozem	20
3 TG Motion	21
3.1 Funkce	21
3.1.1 Generátor žádané polohy (Profile Generator)	21
3.2 Programové ovládání	22
3.2.1 Virtuální PLC	22
3.2.2 Aplikace pod hostujícím operačním systémem	23
3.2.3 Modul CNC	23
4 Robotický manipulátor firmy TG Drives	24
4.1 Koncepce	24
4.2 Softwarové vybavení	25
4.3 Použitý senzor síly a momentu	25
4.3.1 Frekvence vzorkování	26
4.3.2 Vyčítané hodnoty	26
4.4 Filtrace šumu	29
5 Adaptivní řízení	33
5.1 Zpracování dat potřebných pro řízení	33
5.1.1 Transformace souřadnic	33

5.1.2	Identifikace parametrů	36
5.2	Působení požadovanou silou	40
5.2.1	Generátor polohy	40
5.2.2	Regulátor	41
5.2.3	Systém	41
5.3	Ruční navádění	42
5.3.1	Mrtvé pásmo	43
5.3.2	Regulátor	44
5.4	Rozhraní pro ovládání	45
5.4.1	Udržování síly	45
5.4.2	Aplikování síly	46
5.4.3	Nastavení aktuálních sil	48
5.4.4	Nastavení limitů korekce	49
5.4.5	Omezení sil	50
6	Otestování na aplikaci	51
6.1	Referenční snímač	51
6.1.1	Komunikace	51
6.1.2	Zpracování hodnot	52
6.2	Působení požadovanou silou – kreslení na papír	53
6.2.1	Použité programy	53
6.2.2	Použité podložky	54
6.2.3	Použitý papír	55
6.2.4	Měkká podložka	56
6.2.5	Zvlněná podložka	61
6.2.6	Nakloněná rovina	63
6.2.7	Zhodnocení regulace síly	65
6.3	Ruční navádění	67
7	Závěr	69
	Literatura	70
	Seznam symbolů, veličin a zkratek	72
	Seznam příloh	73
A	Průběhy veličin	74
A.1	Nefiltrované detaily vstupních signálů	74
A.2	Filtrované průběhy síly	75
A.2.1	Dlouhodobé	75

A.2.2	Krátkodobé	76
A.3	Spektrum silových signálů	77
B	Testovací programy	79
B.1	Kreslení bez regulace	79
B.2	Kreslení s regulací – požadovaná síla 1N	80
C	Obsah přiloženého CD	81

Seznam obrázků

1.1	Znázornění zón s omezenou rychlostí [5]	14
1.2	Ukázka ručního navádění [1]	15
1.3	YuMi - cobot vybavený kolaborativními funkcemi umožňující bezpro- střední interakci s lidmi. [4]	16
3.1	Výstup generátoru poloh – závislosti rychlostí na čase pro různé typy akceleračních ramp [7]	22
4.1	Robotický manipulátor firmy TG Drives	24
4.2	Senzor síly a momentu HEX-H společnosti Optoforce	26
4.3	Dlouhodobý průběh hodnoty síly na ose X, bez zatížení snímače.	27
4.4	Dlouhodobý průběh hodnoty síly na ose Y, bez zatížení snímače.	27
4.5	Dlouhodobý průběh hodnoty síly na ose Z, bez zatížení snímače.	28
4.6	Detail průběhu hodnot síly na ose Z, bez zatížení snímače.	29
4.7	Spektrum silového signálu snímače na ose Z.	30
4.8	Srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose Y, bez zatížení snímače.	30
4.9	Detail srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose Y, bez zatížení snímače.	31
4.10	Srovnání spekter původních a filtrovaných silových signálů snímače na ose Z.	31
4.11	Obrazovka pro nastavení filtrů programu TG Robot Service	32
5.1	Znázornění souřadných systému robota	34
5.2	Průběh úhlu natočení pro kompenzovaný průběh.	37
5.3	Srovnání vyčtené a kompenzované hodnoty na ose X	38
5.4	Srovnání vyčtené a kompenzované hodnoty na ose Y	38
5.5	Srovnání vyčtené a kompenzované hodnoty na ose Z	39
5.6	Schéma řídicího algoritmu pro působení požadovanou silou	40
5.7	Schéma systému	42
5.8	Schéma řízení volného pohybu	43
5.9	Přenosová funkce mrtvého pásma s prahy -10, 10	44
6.1	Program pro vyčítání hodnot z váhy CAS EC.	52
6.2	Použitá měkká podložka – sešit.	54
6.3	Zvlněná podložka.	55
6.4	Nakloněná rovina.	55
6.5	Výsledek kreslení silou 1 N bez řízení síly.	56
6.6	Průběh působících sil pro kreslení silou 1 N bez řízení síly	56
6.7	Výsledek kreslení silou 1 N s řízením síly.	57
6.8	Průběh působících sil pro silou 1 N s řízením síly.	57

6.9	Výsledek kreslení silou 1 N s řízením síly.	58
6.10	Průběh působících sil pro kreslení silou 1 N s řízením síly.	58
6.11	Výsledek kreslení silou 10 N bez řízení síly.	59
6.12	Průběh působících sil pro kreslení silou 10 N bez řízení síly.	59
6.13	Výsledek kreslení s požadovanou působící silou 10 N s řízením síly. . .	60
6.14	Průběh působících sil pro kreslení silou 10 N s řízením síly.	60
6.15	Výsledek kreslení na zvlněném povrchu silou 3 N bez řízení síly. . . .	61
6.16	Průběh působících sil pro kreslení na zvlněnou podložku silou 3 N bez řízení síly.	61
6.17	Výsledek kreslení na zvlněném povrchu s řízením síly.	62
6.18	Průběh působících sil pro kreslení na zvlněnou podložku silou 3 N s řízením síly.	62
6.19	Výsledek kreslení na nakloněné rovině silou 2 N bez řízení síly.	63
6.20	Průběh působících sil pro kreslení na nakloněné rovině silou 2 N bez korekcí.	63
6.21	Výsledek kreslení na nakloněné rovině silou 2 N s řízením síly.	64
6.22	Průběh působících sil pro kreslení na nakloněné rovině silou 2 N s řízením síly.	64
6.23	Závislost polohy na působící síle v ose X při režimu ručního navádění. .	67
6.24	Závislost polohy na působící síle v ose Y při režimu ručního navádění. .	68
6.25	Závislost polohy na působící síle v ose Z při režimu ručního navádění. .	68
A.1	Detail průběhu hodnoty síly na ose X, bez zatížení snímače.	74
A.2	Detail průběhu hodnoty síly na ose Y, bez zatížení snímače.	74
A.3	Srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose X, bez zatížení snímače.	75
A.4	Srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose Y, bez zatížení snímače.	75
A.5	Detail srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose X, bez zatížení snímače.	76
A.6	Detail srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose Y, bez zatížení snímače.	76
A.7	Spektrum silového signálu snímače na ose X.	77
A.8	Spektrum silového signálu snímače na ose Y.	77
A.9	Srovnání spekter původních a filtrovaných silových signálů snímače na ose X.	78
A.10	Srovnání spekter původních a filtrovaných silových signálů snímače na ose Y.	78

Seznam tabulek

4.1	Srovnání udávaných a naměřených hodnot šumu (směrodatná odchylka signálu bez zatížení senzoru)	28
6.1	Tabulka statistických dat průběhů sil vyčtených z referenčního snímače	65
6.2	Tabulka statistických dat průběhů sil vyčtených z použitého snímače	66
6.3	Tabulka statistických dat průběhů sil vyčtených z referenčního snímače, relativně vztažených k žádané hodnotě.	66
6.4	Tabulka statistických dat průběhů sil vyčtených z použitého snímače, relativně vztažených k žádané hodnotě.	67

Úvod

V současnosti stojíme na prahu takzvané čtvrté průmyslové revoluce, která přináší nasazení kyber-fyzikálních systémů, internetu věcí a internetu služeb.

Jedním kyber-fyzikálním systémem se zabývá i tato práce. Konkrétně se jedná o robotický manipulátor společnosti TG Drives, který v rámci této práce bude obohacen o vlastnosti nezbytné pro fungování v nové éře chytrých továren.

První takovou potřebnou vlastností je vnímání působících sil – ať už robotem vyvolaných, nebo externích působících na robota. Vnímání sil samo o sobě je podstatné už z hlediska sběru dat o průběhu výroby, nicméně jeho možná ještě důležitějším přínosem je aplikace těchto vnímaných sil v algoritmech, které chytře řídí robot bez potřeby zásahu obsluhy, nebo dokonce v kooperaci s obsluhou.

V této práci se podrobně věnuji návrhu, implementaci a ověření funkčnosti dvou takovýchto algoritmů – působení konstantní silou a ručního navádění.

1 Kooperativní roboty

Kooperativní roboty jsou takové roboty, které jsou určeny k fyzické interakci s lidskou pracovní silou a práci ve stejném prostředí.

1.1 Druhy Kooperace

Existuje více způsobů, jak může lidská pracovní síla s roboty kooperovat. Různé druhy mají různá využití a taktéž jiné hardwarové i softwarové požadavky na robota.

[1] [2] [3]

1.1.1 Bezpečnostní monitorované zastavení (Safety-Monitored stop)

Nejprostším způsobem, jak může robot s člověkem sdílet pracovní prostor, je monitorování pracovního prostoru robota. Při vstupu člověka, nebo jiného neočekávaného objektu, jsou prováděné operace pozastaveny. Při pozastavení se aktivují brzdy motorů, ale robot je stále zapnut. Po uvolnění sdílených pracovních prostor robot pokračuje v operacích tam, kde přestal.

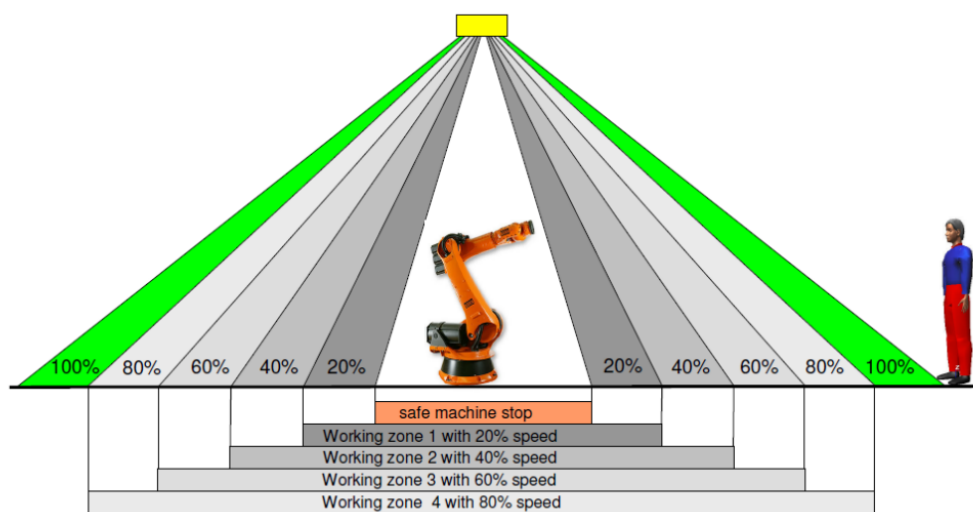
Výhodou tohoto typu kooperace je nenáročnost na potřebný hardware robota – lze využít klasické průmyslové roboty. Nicméně je nutno zajistit robustní detekci narušení sdílených prostor, aby robot takto mohl úspěšně fungovat.

Tento druh kooperace je vhodné využít, pokud nedochází k moc častému nebo dlouhotrvajícímu sdílení prostor s lidskými pracovníky, jinak může docházet k příliš velkému omezení produktivity robota. [1]

1.1.2 Sledování rychlosti a vzdálenosti

Tento typ spolupráce spočívá v monitorování sdílených prostor. Při jejich narušení se rychlost robotem vykonávaných pohybů zpomalí na bezpečnou rychlost, která je obdobně jako ostatní bezpečnostní požadavky stanovena normou. V České republice se jedná o bezpečnostní normu ČSN EN ISO 10218. [3]

Obvykle má robot několik bezpečnostních zón s různými maximálními povolenými rychlostmi. Čím je zóna blíže robotu, tím jsou maximální povolené rychlosti nižší, případně v nejbližší zóně může robot úplně zastavit.



Obr. 1.1: Znázornění zón s omezenou rychlostí [5]

1.1.3 Ruční navádění

Dalším způsobem kolaborace je ruční navádění robotů. Tento způsob kolaborace se využívá především pro učení trajektorií repetitivních úkonů. Při učení člověk působí silou na nástroj připevněný k robotické paži. Tato síla je snímána senzorem síly a robot se hýbe ve směru působení síly. Robot si během učení nahrává vykonávanou trajektorii a po naučení ji je schopen zopakovat.

Při bezprostřední interakci s robotem se kvůli bezpečnosti využívá povolovací tlačítko, někdy označované jako tlačítko mrtvého muže (Dead man's switch), které během navádění musí být stisknuto, jinak se robot nepohybuje.

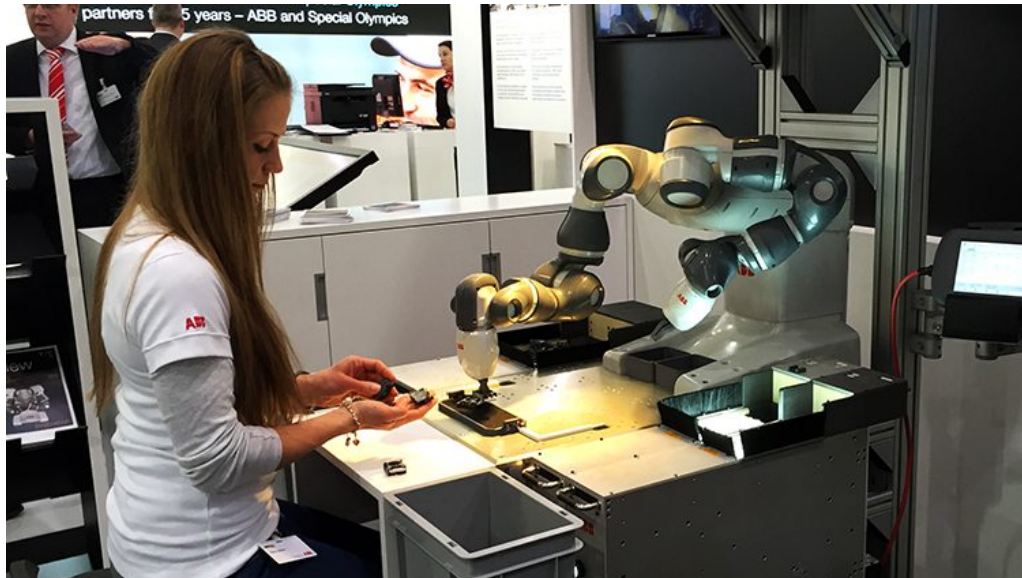
To zajišťuje, že při poruše, která by zapříčinila ohrožení nebo zranění obsluhy, se robot vypne po pouhém povolení tlačítka, k čemuž nemusí být obsluha ani při vědomí.



Obr. 1.2: Ukázka ručního navádění [1]

1.1.4 Omezení síly a výkonu

Posledním způsobem sdílení pracovních prostor je omezení síly a výkonu, kterými robot působí. Při překročení povolených limitů sil, nebo výkonu, dochází k zastavení pohybu robota, nebo protichůdnému pohybu pro omezení předané síly.



Obr. 1.3: YuMi - cobot vybavený kolaborativními funkcemi umožňující bezprostřední interakci s lidmi. [4]

Jelikož roboty určené pro tyto účely nezabraňují nárazu do lidských spolupracovníků, je důležité omezit rizika i pomocí hardwarového návrhu samotného robota. Například pomocí následujících možností:

- Omezení váhy robotické paže – má nižší hybnost než těžší paže při stejných rychlostech, což znamená, že při nárazu nemá tolik energie, kterou by robot mohl předat člověku.
- Zaoblená konstrukce robota a eliminace ostrých hran – při nárazu má vyšší kontaktní plochu a síly se tak lépe rozloží.
- Eliminace míst, kde by mohl robot skřípnout obsluhu.
- Měkké povrchové materiály, omezují přenesené síly při nárazu. [4]
- Povrchová vrstva pokrytá kapacitním snímačem, který detekuje veškerý kontakt a umožňuje zavčas vydat povel k zastavení. [3]

1.2 Souřadné systémy

Z různých druhů aplikací je zřejmé, že pro správné vyhodnocování různých dat – například měřených sil – je potřeba pracovat s více souřadnými systémy.

1.2.1 Rotace kolem jednotlivých os

Pro transformaci vektorů z jednoho souřadného systému si vystačíme s rotačními maticemi.

Následující zápis matic platí pro matice transformující sloupcové vektory podle pravidla pravé ruky.

Rotace kolem osy X

$$R_X(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Rotace kolem osy Y

$$R_Y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Rotace kolem osy Z

$$R_Z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Kombinace rotací

Jelikož pro rotaci se maticemi násobí sloupcové vektory (vektory jsou na pravé straně matice), tak se při násobení více rotačních matic dávají prvně aplikované rotace na pravou stranu rovnice.

Například pro aplikování rotací v pořadí X, Y, Z musíme matice vynásobit v následujícím pořadí:

$$R = R_Z(\gamma)R_Y(\beta)R_X(\alpha) \quad (1.4)$$

Inverze

Jelikož jsou všechny rotační matice ortogonální, je možné inverzi matic zjednodušit na pouhou transpozici.

$$R^{-1} = R^T \tag{1.5}$$

2 Senzory síly a točivého momentu

Jak bylo popsáno v kapitole 1, pro jisté funkce kooperativních robotů je potřeba snímat působící síly, popřípadě točivé momenty.

2.1 Princip

Existuje více principů, které se používají pro snímání sil a momentů v robotice. Nejčastěji využívané snímače fungují na principu odporových tenzometrů.

2.1.1 Odporové tenzometry

Odporové tenzometry jsou snímače, které převádějí deformace, způsobené působící silou, na změnu elektrického odporu. V praxi se často jedná o kovové drátky nalepené na kovové nosníky – deformační členy, které provádějí převod síly na deformaci.

Rovnice odporu vodiče je popsána rovnicí 2.1. Při deformaci tenzometru (zkrácení/ prodloužení) dochází ke změně elektrického odporu.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.1)$$

Kde:

R = Elektrický odpor tenzometru $[\Omega]$

ρ = Měrný elektrický odpor materiálu tenzometru $[\Omega m]$

l = Délka vodiče, ze kterého se tenzometr skládá $[m]$

S = Průměr vodiče $[m^2]$

Rovnice 2.2 poté popisuje poměrné změny odporu, které se v praxi vyhodnocují.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \epsilon \quad (2.2)$$

Kde:

ΔR = Změna elektrického odporu $[\Omega]$

R = Elektrický odpor v klidovém stavu $[\Omega]$

K = Součinitel deformační citlivosti tenzometru $[-]$

ϵ = Poměrné prodloužení $[-]$ (viz 2.3)

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.3)$$

Kde:

ϵ = Poměrné prodloužení $[-]$

Δl = Změna délky $[m]$

l = Délka v klidovém stavu $[m]$

Jelikož je roztažnost materiálů teplotně závislá, je nutné tyto vlivy kompenzovat pomocí správného zapojení několika tenzometrů – např. do tzv. Wheatstonova můstku.

2.2 Umístění senzorů

2.2.1 Před efektor

V případě víceosých senzorů je možné je umístit před efektor. Data ze senzoru tedy nejsou ovlivněna celou konstrukcí robotické paže, ale jenom připevněného efektoru, a tím pádem senzory nemusí mít takový rozsah.

2.2.2 U každého kloubu

Pro správné fungování cobota s omezeným působením síly (viz sekce 1.1.4) je potřeba mít snímač síly/ momentu u každého kloubu, aby se cobot zastavil i v případě, že narazí do spolupracujícího člověka libovolnou částí robotické paže.

Pro získání sil a momentů na efektoru je ovšem nutné provést kompenzaci a transformaci jednotlivých snímaných hodnot. Pro dosažení stejné přesnosti sil na efektoru je tedy nutné použít mnohem přesnější snímače, navíc ve větším počtu.

2.2.3 U každého kloubu a před efektozem

Při požadavku na přesné snímání sil působících na efektor a zároveň omezení působících sil v celém robotickém rameni nastává problém příliš velké ceny jednotlivých snímačů (snímače musejí být velice přesné).

Tento problém je možné vyřešit využitím levných, nepřesných snímačů u jednotlivých kloubů, které se využívají pouze pro detekce kolizí, v kombinaci s přesným víceosým snímačem umístěným před efektozem.

3 TG Motion

TG Motion je univerzální řídicí systém firmy TG Drives s.r.o. Přes jeho univerzálnost je primárně určen pro ovládání servopohonů. S tím jsou spjaty aplikace, pro které je systém nejvíce uzpůsoben – jmenovitě řízení počítačem ovládaných (CNC) obráběcích strojů. [6]

3.1 Funkce

Hlavní funkcí TG Motion je řízení a obsluha servopohonů. To zahrnuje všechno od zajišťování komunikace až po různorodé výpočty poloh motorů.

3.1.1 Generátor žádané polohy (Profile Generator)

Generátor žádané polohy je metoda pro průběžné generování poloh podle několika parametrů.

Rychlostní režim

Generátor polohy v rychlostním režimu je parametrizován akcelerací, počáteční a požadovanou rychlostí. Dokud se nedosáhne požadované rychlosti, tak se rychlost mění o integraci akcelerace. Integraci aktuální rychlosti se vypočítává aktuální poloha, která se posílá do servopohonů.

Tím se do regulace servopohonů zapojuje i poziční smyčka, díky tomu je kromě dodržení rychlosti zajištěno i ujetí dráhy odpovídající integraci žádané rychlosti.

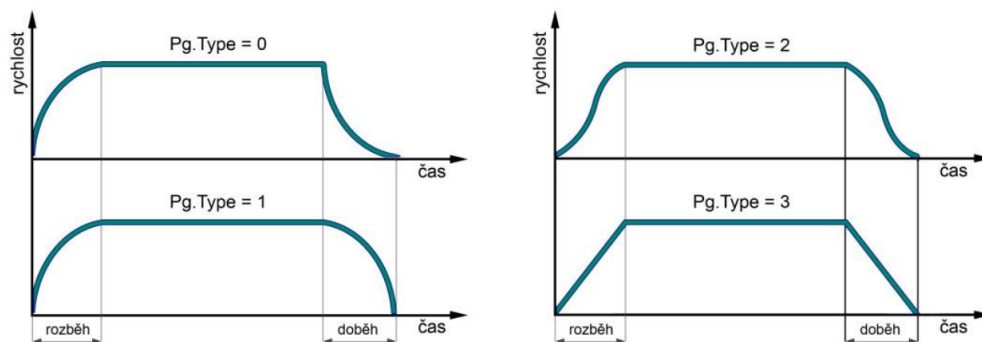
Polohový režim

Generátor polohy v polohovém režimu je parametrizován akcelerací, decelerací, počáteční a žádanou rychlostí, startovní a koncovou polohou. Při odstartování generování poloh se zpočátku chová obdobně jako rychlostní varianta.

Podle zadaných hodnot decelerace a koncové polohy se poté určí poloha, od které je potřeba začít decelerovat, aby se pohyb zastavil přesně v koncové poloze.

Akcelerační rampy

Pro hladší průběh akcelerace a decelerace se kromě prostých lineárních akceleračních ramp využívá akceleračních ramp s harmonickým průběhem, které lépe kopírují fyzické chování mechanických systémů. Akcelerační rampy podporované TG Motion jsou znázorněny na obrázku 3.1. [7]



Obr. 3.1: Výstup generátoru poloh – závislosti rychlostí na čase pro různé typy akceleračních ramp [7]

Aplikační rozhraní

TG Motion má pro generátory poloh registrové rozhraní – do jedné skupiny registrů se zapíše parametry a podle nich se do druhé skupiny registrů zapíše výstupní veličiny.

Samotný výpočet probíhá mezi voláním uživatelského programu, tudíž výsledné hodnoty jsou k dispozici až jeden cyklus programu po nastavení parametrů.[7]

3.2 Programové ovládání

TG Motion je možné programově ovládat několika různými způsoby – pomocí real-time programu tzv. virtuálního programovatelného logického automatu (PLC) nebo aplikace běžící pod hostujícím operačním systémem (u standardní verze TG Motion je to Windows).

3.2.1 Virtuální PLC

Hlavním způsobem, jak programově ovládat TG Motion, je virtuální PLC. Z praktického hlediska je virtuální PLC nativně kompilovaná knihovna vystavující C API, které TG Motion periodicky volá.

Jelikož systém běží pod operačním systémem reálného času (RTOS), jeho programování je v některých ohledech omezeno – nelze využívat dynamické alokace paměti a logicky ani API operačního systému (např. funkce pro práci se soubory), který běží paralelně s RTOS.

Vzhledem k výše zmíněným vlastnostem virtuální PLC není úplně vhodné používat pro dynamicky se měnící programy – například projíždění různých trajektorií.

3.2.2 Aplikace pod hostujícím operačním systémem

S TG Motion je možno interagovat přes paměťový prostor, který je sdílený mezi klasickým operačním systémem a RTOS. Jelikož není zajištěna interakce v reálném čase, tento typ aplikace není vhodný pro bezprostřední řízení systému.

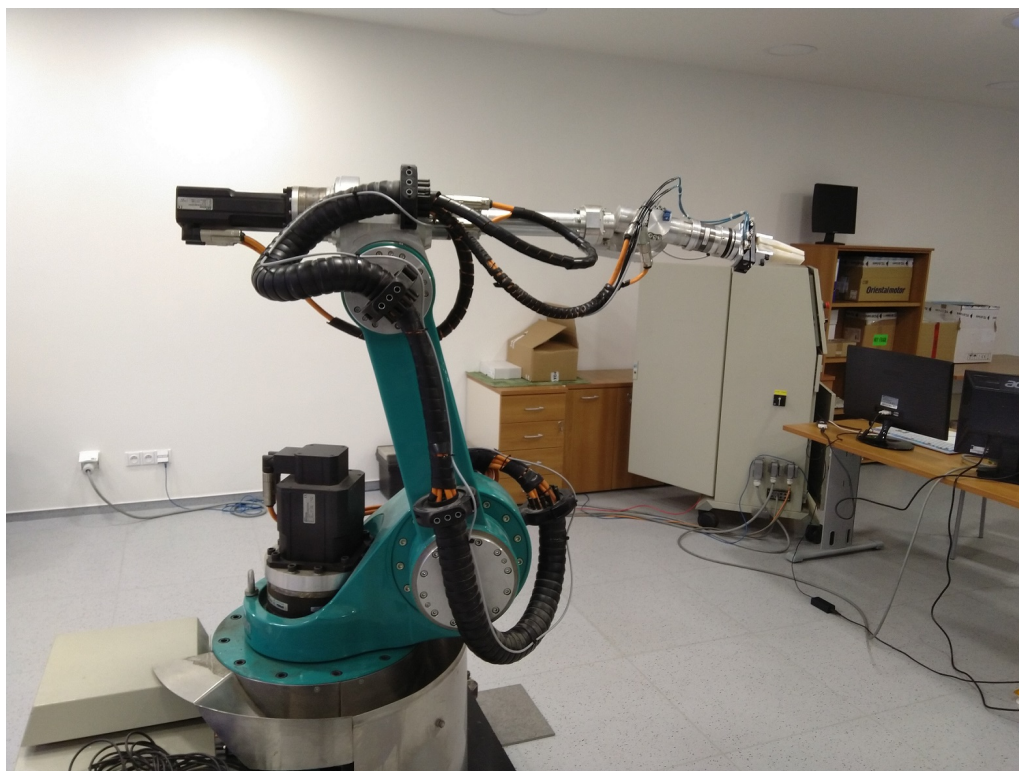
3.2.3 Modul CNC

TG Motion obsahuje modul zaměřený na práci s CNC. Hlavní součástí tohoto modulu je interpolace pohybových úkonů pro všechny osy daného zařízení. Další důležitou schopností CNC modulu je načítání programů napsaných pomocí programovacího jazyka určeného pro CNC stroje – G-Kódu a jejich předávání TG Motion. Díky tomu je možné dynamicky za běhu virtuálního PLC načítat různé trajektorie, resp. jiné programy.

4 Robotický manipulátor firmy TG Drives

Vyvíjené algoritmy jsou určeny pro robotický manipulátor firmy TG Drives. Současná testovací podoba robota je zachycena na obrázku 4.1. Jedná se pouze o testovací verzi robota, a tudíž musí být všechny vyvíjené algoritmy pro řešené problémy univerzální a lehko přizpůsobitelné na jiné roboty.

Robot je přizpůsoben na klasickou průmyslovou činnost bez kooperace s člověkem, jelikož mu chybí jakékoliv bezpečnostní prvky popsané v kapitole 1. Jedinou možností kooperace, ke které má robot hardwarovou výbavu, je ruční navádění, protože je vybaven tenzometrickým senzorem sil a momentů.



Obr. 4.1: Robotický manipulátor firmy TG Drives

4.1 Koncepce

Výhodou tohoto robota je možnost velice rychlého polohového řízení – s komunikační periodou až $250 \mu s$. Toho je docíleno pomocí dvou komponentů:

1. Realtime řídicí systém TG Motion, který stíhá přepočítávat řízené polohy v alokovaném časovém prostoru s hard real-time požadavky.
2. Komunikační sběrnice EtherCAT pro přenos dat z řídicího systému do servozesilovačů.

Dalším klíčovým rysem řešení robota je minimalizace analogových částí. Díky tomu se neprojeví řada negativních rušivých vlivů. Tato minimalizace spočívá v následujících částech:

- Přenos žádané polohy až do servozesilovačů probíhá digitálně přes EtherCAT (u testovací verze robota CAN).
- Snímané síly a momenty jsou přenášeny co největší část cesty digitálně. Analogový přenos probíhá pouze ze snímače do výpočetního modulu.

4.2 Softwarové vybavení

Robot je řízený řídicím systémem TG Motion (blíže popsáný v kapitole 3). Programová obsluha je rozdělena na dvě hlavní části – virtuální PLC a obslužnou aplikaci.

Z obslužné aplikace se virtuálnímu PLC předávají požadavky na pohyby – ať už ruční, nebo komplexní trajektorie programované v G-Kódu.

Virtuální PLC je poté ještě rozdělena na následující dílčí části:

- vlastní obsluha servopohonů,
- přepočet poloh motorů na polohu koncového bodu a opačně,
- zpracování výstupních dat tenzometru a jejich použití pro adaptivní řízení – tato část je hlavním předmětem této práce.

4.3 Použitý senzor síly a momentu

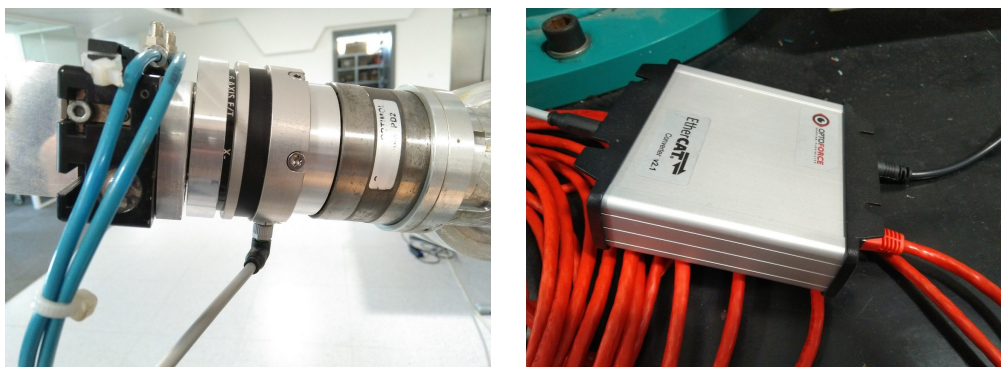
Robot je vybaven šestiosým snímačem síly a momentu umístěným před efektor. Konkrétně se jedná o model HEX-H společnosti OptoForce¹.

Senzor disponuje ve všech osách rozsahem měřených sil 200 N a rozlišením 0,1 N. Pro točivý moment je rozsah 20 Nm pro osy X a Y a 13 Nm pro osu Z. Rozlišení točivého momentu je pro všechny osy 0,001 Nm. [8]

Senzor je připojen k výpočetnímu zařízení OptoForce ComputeBox, které převádí analogové signály na digitální a poskytuje základní možnosti předzpracování signálů. Toto zařízení poskytuje komunikační rozhraní EtherCAT, které je využíváno pro komunikaci s řídicím systémem, a USB rozhraní pro servisní účely.

Senzor i s výpočetním modulem je zobrazen na obrázku 4.2.

¹Společnost OptoForce již neexistuje, jelikož se stala součástí společnosti *On robot*[9]



(a) Analogová část senzoru integrovaná do robotické paže (b) Výpočetní modul ComputeBox

Obr. 4.2: Senzor síly a momentu HEX-H společnosti Optoforce

4.3.1 Frekvence vzorkování

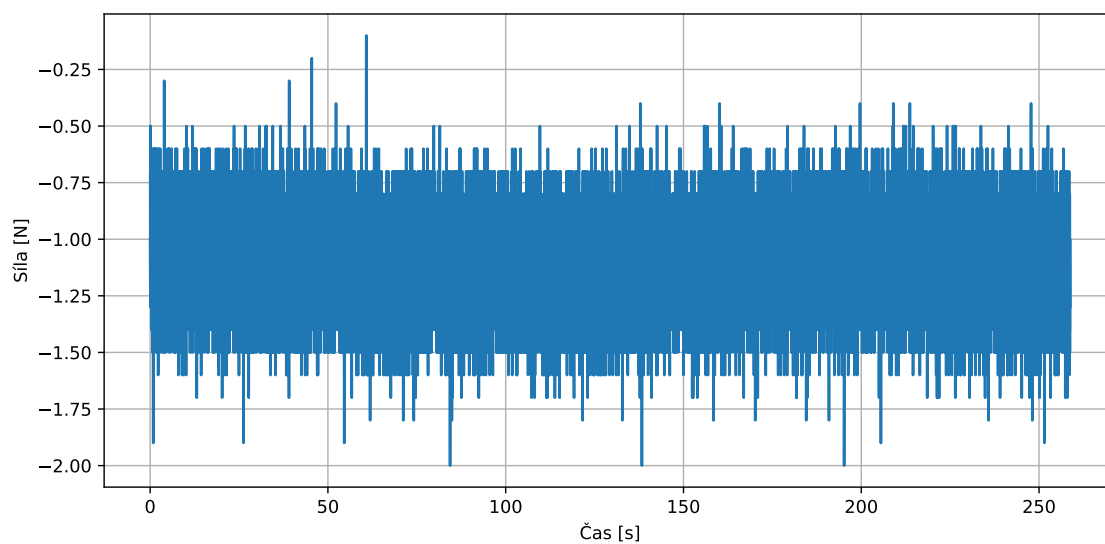
V datasheetu dodaného se snímačem je uvedeno, že senzor má napevno nastavenou neměnnou vzorkovací frekvenci 500 Hz. Nicméně po přeměření získávaných dat se ukázalo, že ve skutečnosti vzorkuje pouze frekvencí 100 Hz.

Po dalších experimentech se ukázalo, že USB monitorovací software je schopen nastavit určité frekvence vzorkování, mezi něž patří i žádaných 500 Hz, nicméně toto nastavení není možné uložit do snímače a pro správnou funkčnost senzoru je tedy nutné ho při každém spuštění robota ručně nastavit.

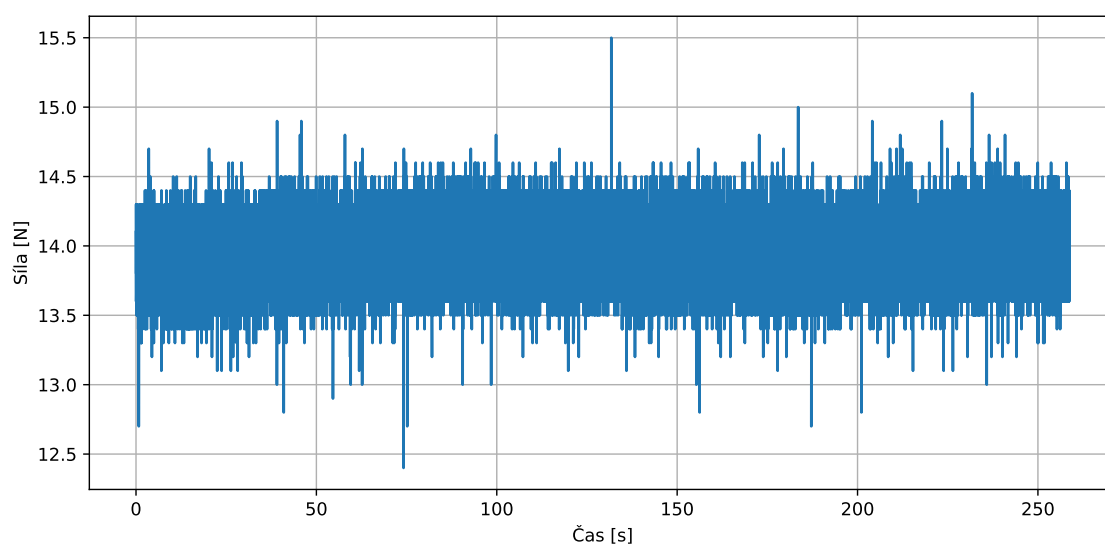
Přes EtherCAT, kterým řídicí systém se snímačem komunikuje, vzorkovací frekvence nastavit nelze. Proto tento snímač se současným firmwarovým vybavením není vhodné použít v reálných aplikacích, kde je vyšší vzorkovací frekvence potřebná pro správnou funkčnost.

4.3.2 Vyčítané hodnoty

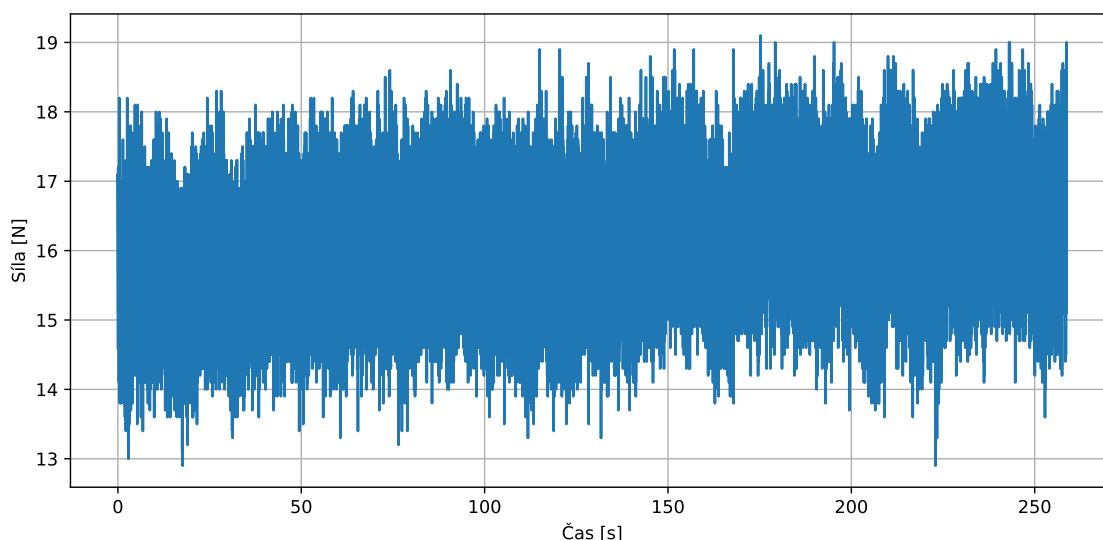
Změřené dlouhodobé průběhy hodnot sil pro jednotlivé osy jsou zachyceny na obrázcích 4.3, 4.4 a 4.5. Náhledy na prvních 10 sekund těchto průběhů jsou k nalezení na obrázcích A.1, A.2 a 4.6. Tyto hodnoty byly zaznamenány pomocí osciloskopu systému TG Motion se vzorkovací periodou 3000 μ s.



Obr. 4.3: Dlouhodobý průběh hodnoty síly na ose X, bez zatížení snímače.



Obr. 4.4: Dlouhodobý průběh hodnoty síly na ose Y, bez zatížení snímače.



Obr. 4.5: Dlouhodobý průběh hodnoty síly na ose Z, bez zatížení snímače.

Jak je možné vidět ze znázorněných průběhů hodnot sil (obr. 4.3, 4.4 a 4.5), i při nulovém zatížení senzor vrací nenulové, nezanedbatelné hodnoty sil a momentu.

Při připevnění efektoru senzor měří i gravitační síly působící na samotný efektor – kompenzaci těchto sil náleží další kapitoly.

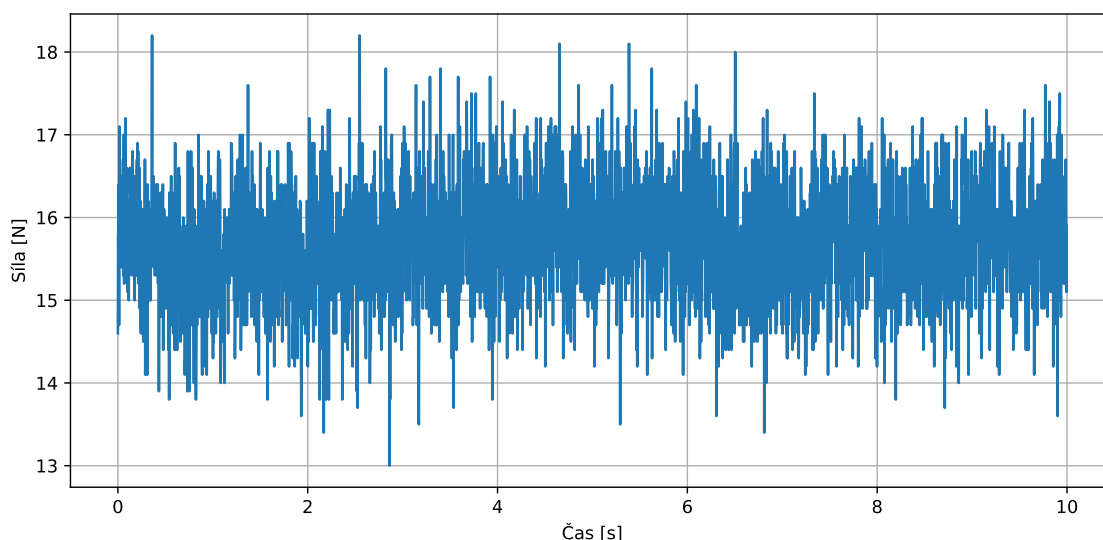
Šum

Z průběhů hodnot sil (obr. 4.3, 4.4 a 4.5) je patrné, že šumem nejvíce zatíženou osou je osa Z, proto se v následující sekci budu věnovat právě šumu na této ose (průběhy ostatních os je možno nalézt v příloze, v kapitole A).

Srovnání změřených a v datasheetu uváděných typických hodnot šumu lze nalézt v tabulce 4.1. Z tabulky je zřejmé, že senzor v ose Z je mnohem více zašuměný, než udává výrobce.

	Datasheet (1 s)	Naměřeno (1 s)	Naměřeno (258 s)
Osa X	0,10N	0,16N	0,16N
Osa Y	0,10N	0,18N	0,19N
Osa Z	0,20N	0,68N	0,75N

Tab. 4.1: Srovnání udávaných a naměřených hodnot šumu (směrodatná odchylka signálu bez zatížení senzoru)



Obr. 4.6: Detail průběhu hodnot síly na ose Z, bez zatížení snímače.

4.4 Filtrace šumu

Ze spektra signálu (obr. 4.7) je zřejmé, že snímač je zatížen bílým šumem, a proto nelze jednoduše odfiltrovat. Pro alespoň částečné odfiltrování nežádoucích složek signálu je možno využít dolnoproustní filtr.

Výpočetní jednotka senzoru poskytuje rozhraní pro filtrování signálů, nicméně to má několik následujících omezení:

- Je poskytnuto jen 6 různých mezních frekvencí pro předpočítané dolnoproustní filtry.
- Filtrované hodnoty jsou komunikovány s rozlišením 0.1 N, a tedy pro nadřazené řízení mohou poskytovat příliš kmitavé hodnoty.
- Filtrování je vázáno na konkrétní snímač, resp. řadu produktů od daného výrobce, takže při výměně snímače je možné, že by se muselo předělat celé filtrování signálu.

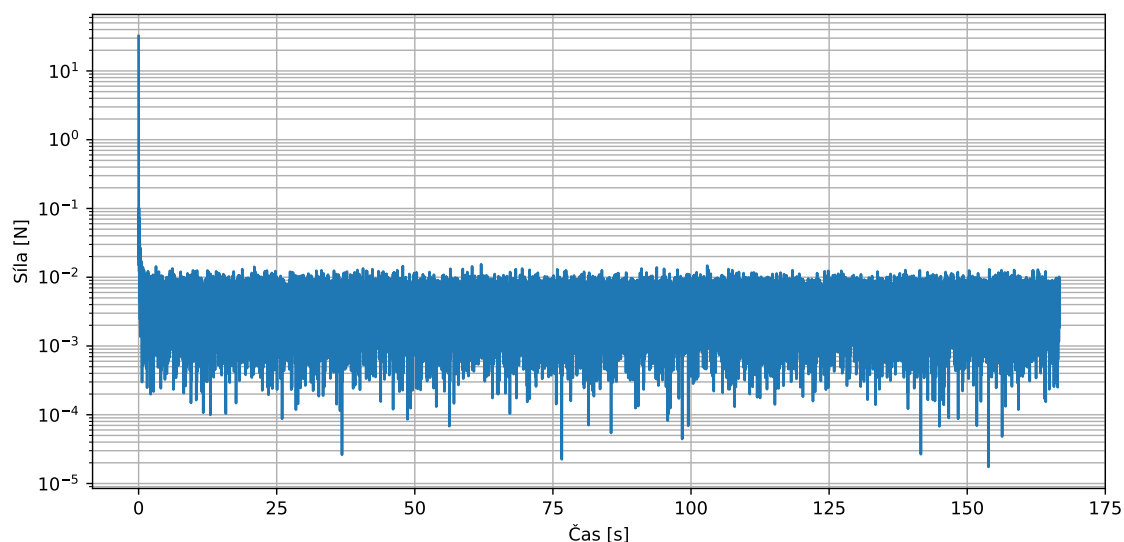
Proto se filtrování výpočetní jednotky senzoru používá pouze jako antialiasing filtr s mezní frekvencí 150 Hz, což je předdefinovaná mez nejbližší k frekvenci vyčítání hodnot z výpočetní jednotky senzoru (333 Hz), a pro zbytek filtrování bylo nutno vytvořit vlastní řešení, a to na bázi IIR filtru.

Jako kompromis zachování rychlosti odezvy potřebné pro testovací aplikace a zároveň odfiltrování co nejvíce složek šumu byl zvolen IIR filtr třetího řádu, typu Bessel s mezní frekvencí 15 Hz. Typ filtru byl zvolen pro jeho minimální překmit mezi IIR filtry.

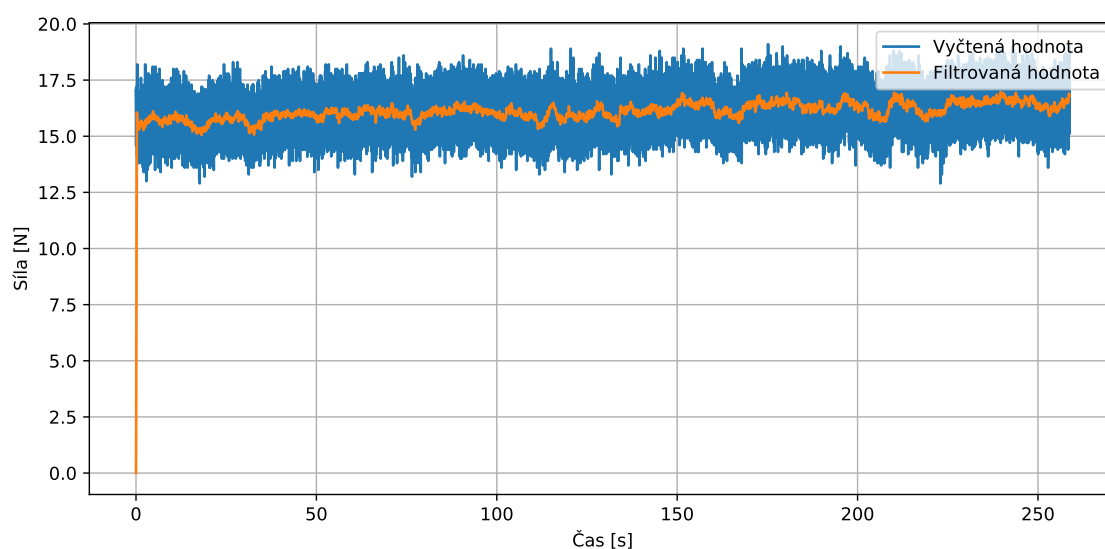
Filtrovaný průběh výsledného signálu je pro osu Z znázorněn v obrázku 4.8

(průběhy os X a Y jsou k nalezení v příloze na obr. A.3, resp. A.4). Detail průběhu je zachycen na obrázku 4.9 (detaily průběhů os X a Y jsou znázorněny v obr. A.5, resp. A.6). Spektrum filtrovaného signálu je možno vidět na obrázku 4.10 (pro osy X a Y na obr. A.10, resp. 4.10).

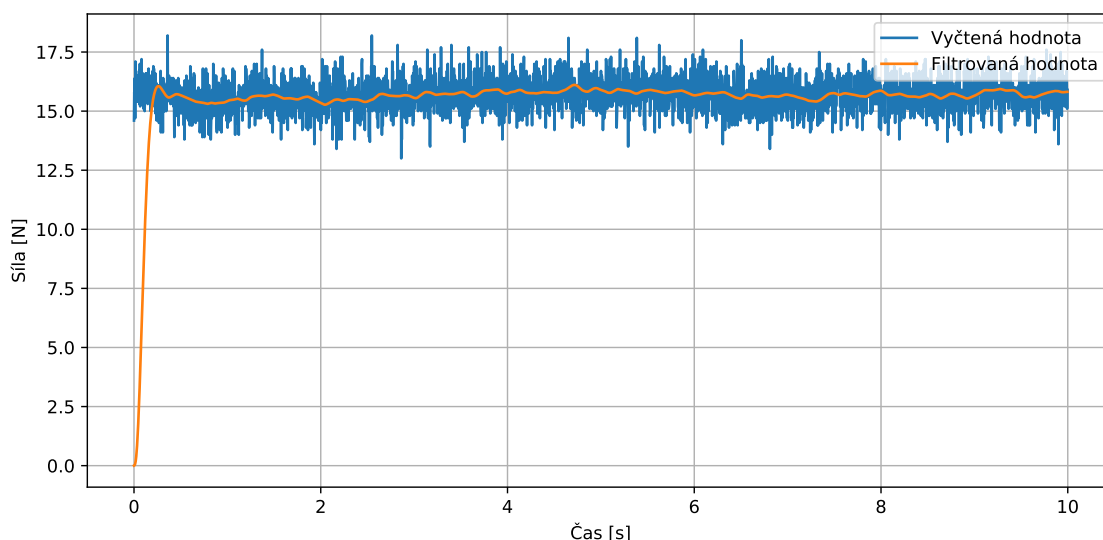
Z filtrovaného průběhu (obr. 4.8) je zřejmé, že i po filtraci je signál osy Z zatížen chybou ± 1 N a snímač tedy není vhodné použít v aplikacích s požadavky na přesné měření absolutních hodnot sil, při působení sil v ose Z snímače.



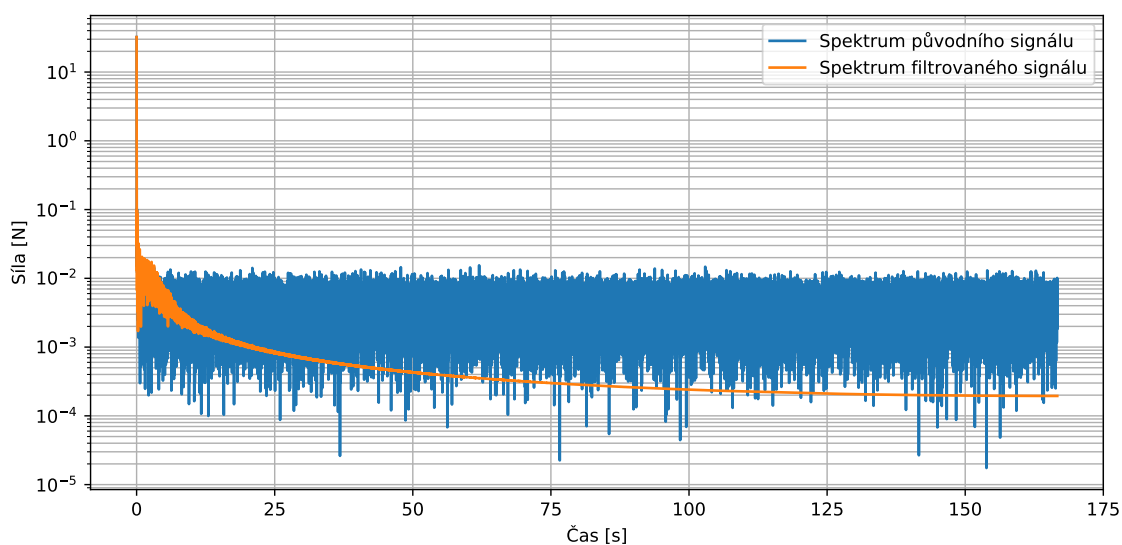
Obr. 4.7: Spektrum silového signálu snímače na ose Z.



Obr. 4.8: Srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose Y, bez zatížení snímače.



Obr. 4.9: Detail srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose Y, bez zatížení snímače.



Obr. 4.10: Srovnání spekter původních a filtrovaných silových signálů snímače na ose Z.

Jelikož současná verze robota je určena jen pro testování a vývoj a v praktických aplikacích může dojít k některé z následujících změn, bylo potřeba udělat filtrovací část programu snadno nastavitelnou pro danou aplikaci.

Možné změny, kvůli kterým je nutné nastavitelné filtrování:

- Použití jiného snímače s jiným rozsahem a vlivem šumu.
- Použití robota v aplikacích s rychlejší dynamikou.

- Použití motorů s rychlejším komunikačním rozhraním, a tudíž změny frekvence běhu celého programu.

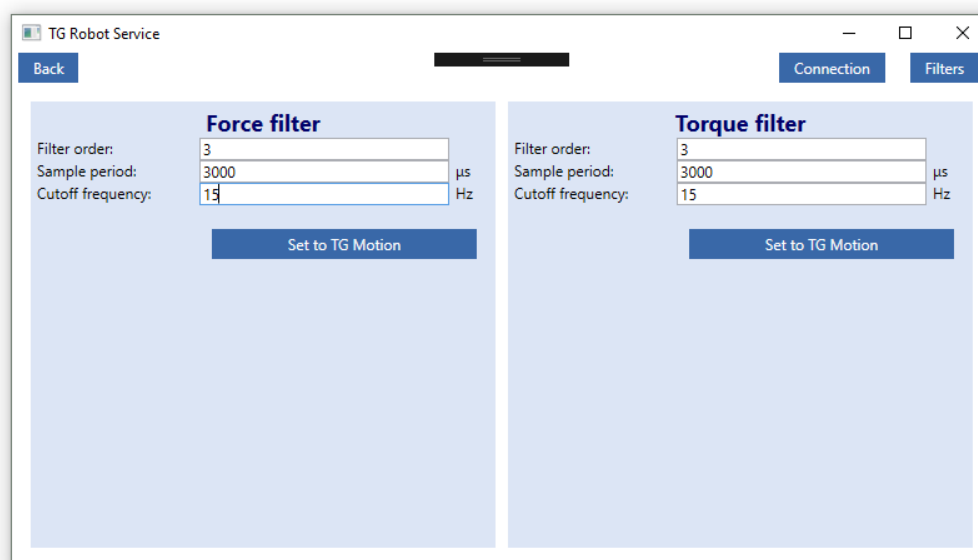
Ideálně by přepočet parametrů filtrů probíhal v PLC části systému a parametry by bylo možné měnit s využitím univerzální servisní aplikace. Nicméně pro jazyk C++, který je použitý pro tvorbu PLC, neexistují již hotové knihovny pro návrh filtrů, nebo nesplňují některé z omezujících kritérií systému, jako zákaz dynamických alokací (rtfilter [10]), popřípadě mají příliš velké paměťové nároky (IIR1 – Real-time C++ filter library[11]) a vytvoření svoji vlastní knihovny by bylo časově příliš náročné.

Proto bylo zvoleno řešení spočívající v použití jednoduchého filtrování v real-time programu parametrizované pouze pomocí koeficientů diferenciálních rovnic a jednoduché servisní aplikace počítající tyto koeficienty.

Servisní aplikace pracuje pod OS Windows a tím pádem je možno využít hotových knihoven bez jakéhokoli omezení. Tato aplikace kombinuje dva jazyky – Python a C#. Část napsaná v jazyce Python s využitím knihovny SciPy[12] provádí samotný výpočet parametrů filtrů. C# část poté zajišťuje grafické rozhraní a přenos dat do realtime systému.

C# byl využit kvůli již hotovému řešení komunikace s realtime systémem, které je napsané právě v tomto jazyku. Nicméně pro tento jazyk se mi nepodařilo najít knihovnu pro návrh filtrů, která by měla požadovaný výstup. Proto je využit Python s knihovnou SciPy, která obsahuje vše potřebné.

Ukázka aplikace je zobrazena na obrázku 4.11.



Obr. 4.11: Obrazovka pro nastavení filtrů programu TG Robot Service

5 Adaptivní řízení

5.1 Zpracování dat potřebných pro řízení

Jak bylo zmíněno v sekci 4.3.2, dostupné hodnoty snímaných veličin jsou zatíženy statickým offsetem a gravitační silou, která je závislá na právě připojeném efektoru. Vyčtené hodnoty poté odpovídají rovnici 5.1.

$$F_S = F_A + F_O + {}_S F_G = F_A + F_O + {}_S^R R \cdot {}_R F_G \quad (5.1)$$

Kde:

F_S = Vektor vyčítaných hodnot sil ze senzoru [N]

F_A = Vektor skutečných hodnot sil působících na senzor [N]

F_O = Vektor offsetu sil senzoru [N]

${}_S F_G$ = Vektor gravitačních sil působících na efektor (souřadnic senzoru) [N]

${}_S^R R$ = Transformační matice robot => senzor

${}_R F_G$ = Vektor gravitačních sil působících na efektor (souřadnice robota) [N]

Přičemž gravitační síla působí v souřadnicích robota pouze v ose Z, tudíž platí rovnice 5.2.

$${}_R F_G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -G \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Kde:

${}_R F_G$ = Vektor gravitačních sil působící na efektor (souřadnice robota) [N]

G = Velikost gravitační síly [N]

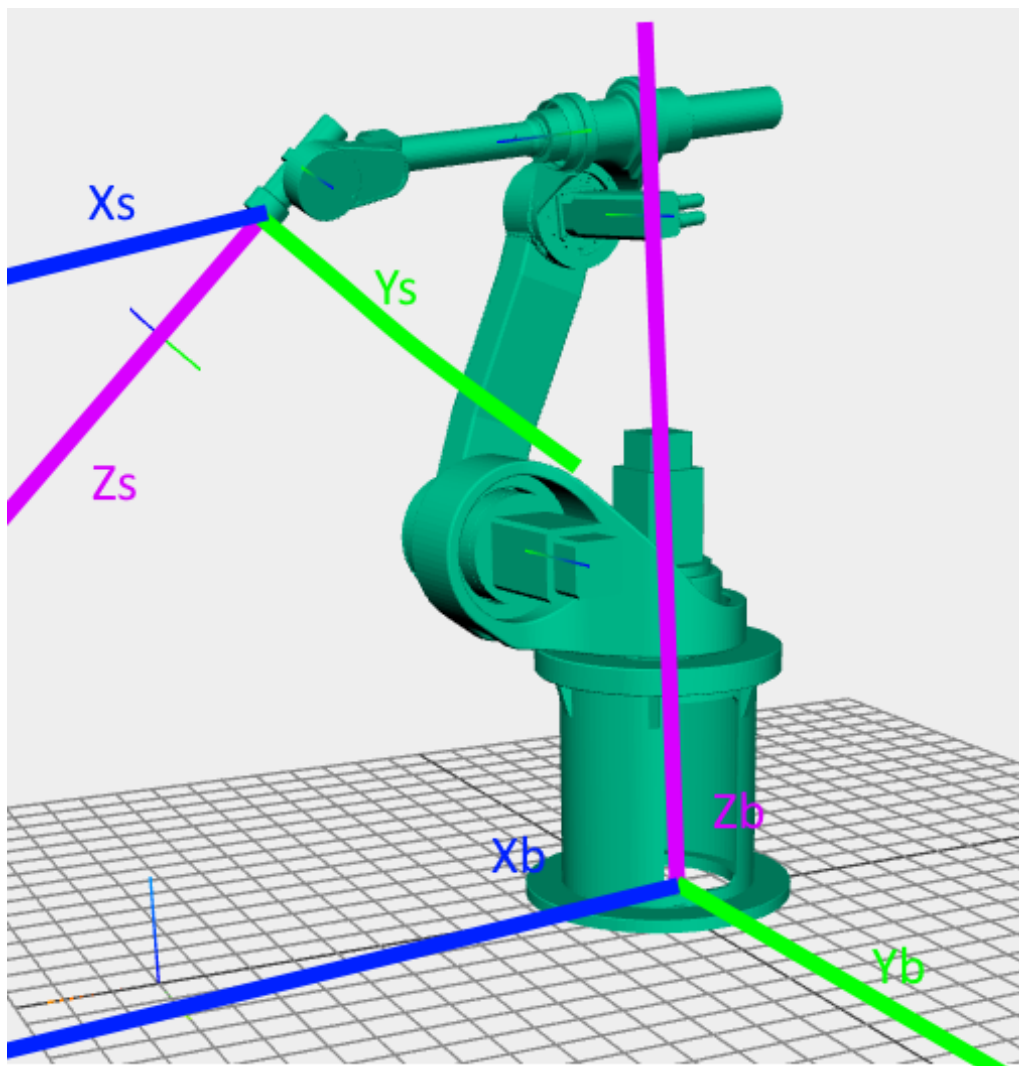
Pro kompenzaci těchto vlivů byl implementován algoritmus založený na identifikaci jednotlivých parametrů. Identifikace spočívá v naměření výstupních hodnot senzoru při různých úhlech natočení nástroje a následném několikakrokovém hledání daných parametrů pomocí metody nejmenšího čtverce. [13].

Výhodou použití této metody je možné algoritmizování hledání daných parametrů, a tudíž snadná kalibrace s minimem potřebné interakce od obsluhy. Kalibraci je nutné provést při výměně efektoru nebo časovém driftu parametrů snímače.

5.1.1 Transformace souřadnic

Z rovnice 5.1 je patrné, že pro identifikování parametrů snímače je potřeba transformační matice pro převod vektorů ze souřadnic robota do souřadnic senzoru (viz obrázek 5.1).

Vzhledem k tomu, že ve výchozí pozici senzoru (nulové rotace α, β, γ) je souřadný systém orientován jinak než souřadný systém robota, musíme kromě prostých rotací



Obr. 5.1: Znázornění souřadných systému robota

kolem jednotlivých os uvažovat také celkovou rotaci souřadného systému. Ta je pro daný robot vyjádřena v rovnici 5.3

$$R_{OS} = R_y(-90^\circ) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Protože senzor nemusí být totožně orientovaný jako souřadnice robota, musíme počítat i s natočením senzoru kolem jeho osy Z

Když se všechny tyto rotace zkombinují, vznikne rovnice 5.4 pro transformaci vektorů ze souřadnic robota do souřadnic senzoru.

$${}^R_S R = R_{Al}(\theta) \cdot R_{OS} \cdot R_X(\alpha) \cdot R_Y(\beta) \cdot R_Z(\gamma) \quad (5.4)$$

Kde:

${}^R_S R$ = Transformační matice robot => senzor

R_{OS} = Transformační matice orientace senzoru

R_X = Rotační matice kolem osy X

R_Y = Rotační matice kolem osy Y

R_Z = Rotační matice kolem osy Z

R_{Al} = Rotační matice kolem osy Z, pro srovnání os robota a snímače

α = Úhel natočení koncového bodu kolem osy X [rad]

β = Úhel natočení koncového bodu kolem osy Y [rad]

γ = Úhel natočení koncového bodu kolem osy Z [rad]

θ = Úhel potřebný ke srovnání os robota a snímače [rad]

V rovnici 5.4 známe všechny úhly pro výpočet kromě θ , proto lze vyjádřit rovnice 5.5.

$$\begin{aligned} {}^R_S R &= R \cdot R_{Al} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta R_{11} - \sin\theta R_{21} & \cos\theta R_{12} - \sin\theta R_{22} & \cos\theta R_{13} - \sin\theta R_{23} \\ \sin\theta R_{11} + \cos\theta R_{21} & \sin\theta R_{12} + \cos\theta R_{22} & \sin\theta R_{13} + \cos\theta R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Kde:

${}^R_S R$ = Transformační matice robot => senzor

R = Transformační matice robot => senzor, bez srovnání os

R_{Al} = Rotační matice kolem osy Z, pro srovnání os robota a snímače

R_{xy} = Koeficienty transformační matice R [-]

θ = Úhel potřebný ke srovnání os robota a snímače [rad]

5.1.2 Identifikace parametrů

Při nulové působící síle a dosazení rovnice 5.5 do rovnice 5.4 vznikne soustava rovnic, skládající se z rovnic: 5.6, 5.7, 5.8.

$$F_X = -G \cdot (\cos\theta R_{13} - \sin\theta R_{23}) + F_{OX} \quad (5.6)$$

$$F_Y = -G \cdot (\sin\theta R_{13} + \cos\theta R_{23}) + F_{OY} \quad (5.7)$$

$$F_Z = -G \cdot R_{33} + F_{OZ} \quad (5.8)$$

Kde:

F_X = Naměřená hodnota síly na ose X [N]

F_Y = Naměřená hodnota síly na ose Y [N]

F_Z = Naměřená hodnota síly na ose Z [N]

G = Velikost gravitační síly působící na efektor [N]

F_{OX} = Velikost offsetu snímané síly na ose X [N]

F_{OY} = Velikost offsetu snímané síly na ose Y [N]

F_{OZ} = Velikost offsetu snímané síly na ose Z [N]

θ = Velikost úhlu potřebného ke srovnání os robota a snímače [rad]

R_{xy} = Koeficienty transformační matice robot => senzor, bez srovnání os [-]

Metodou nejmenšího čtverce se z rovnice 5.8 získají hodnoty offsetu osy Z (F_{OZ}) a gravitační síly působící na efektor (G).

Spočtená hodnota gravitační síly se potom dosadí do rovnic 5.6 a 5.7. Tyto rovnice se poté řeší metodou nejmenších čtverců jako soustava dvou rovnic se třemi neznámými – výsledkem jsou offsety pro osy X a Y a úhel natočení *theta*.

Daný algoritmem je časově značně náročný. Pro jeho urychlení se může pro výpočet využít každý x-tý naměřený vzorek. To má minimální vliv na přesnost spočtených parametrů, ale vliv na čas výpočtu je značný.

Kalibrace TG Robota

Pro kalibrační průběh s průběhem úhlů natočení zobrazenými na obrázku 5.2 byly podle výše uvedených rovnic spočteny následující kompenzační konstanty:

$$G = 6.73 \text{ N}$$

$$F_{OX} = 1.84 \text{ N}$$

$$F_{OY} = 7.92 \text{ N}$$

$$F_{OZ} = 13.04 \text{ N}$$

$$\theta = -6.37 \text{ rad} = -0.09 \text{ rad}$$

Kde:

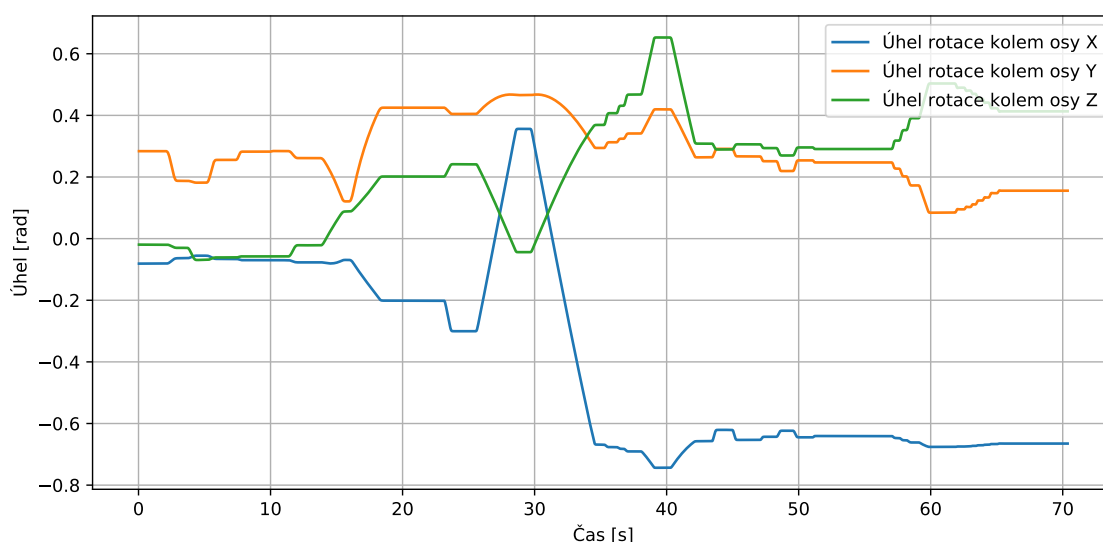
G = Gravitační síla [N]

F_{OX} = Offset sil senzoru pro osu X [N]

F_{OY} = Offset sil senzoru pro osu Y [N]

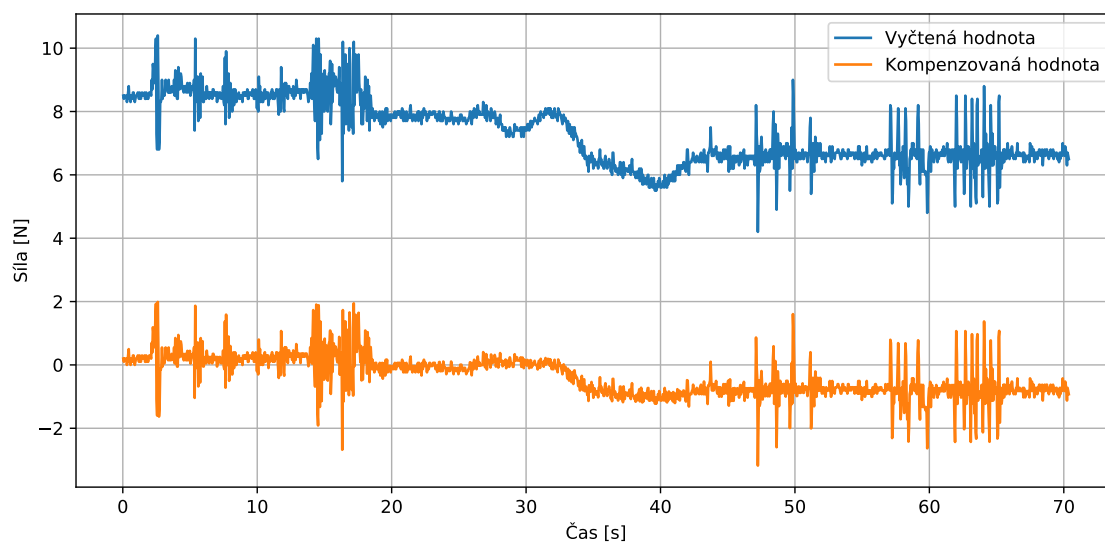
F_{OZ} = Offset sil senzoru pro osu Z [N]

θ = Úhel potřebný ke srovnání os robota a snímače [rad]

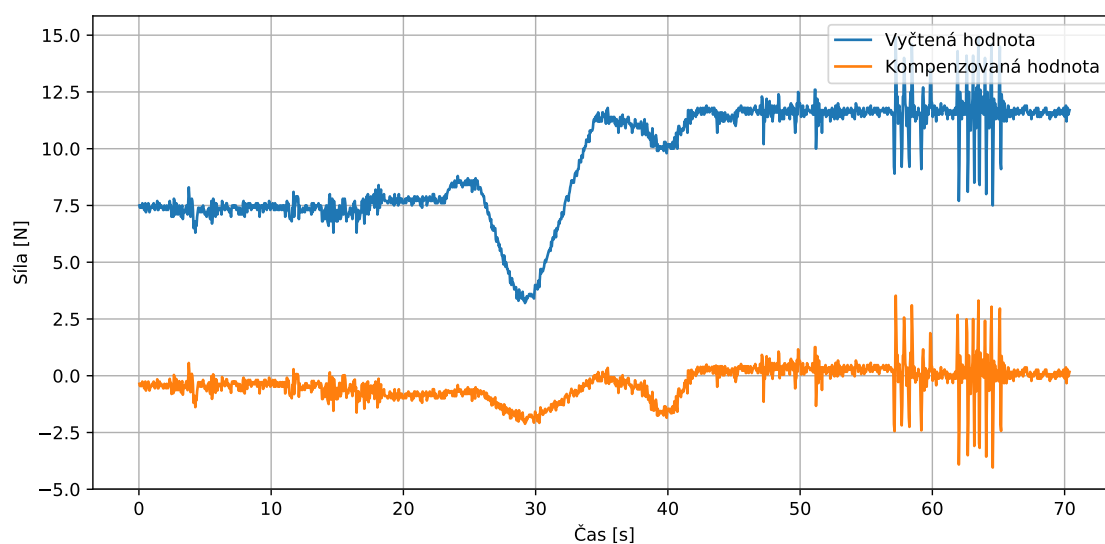


Obr. 5.2: Průběh úhlu natočení pro kompenzovaný průběh.

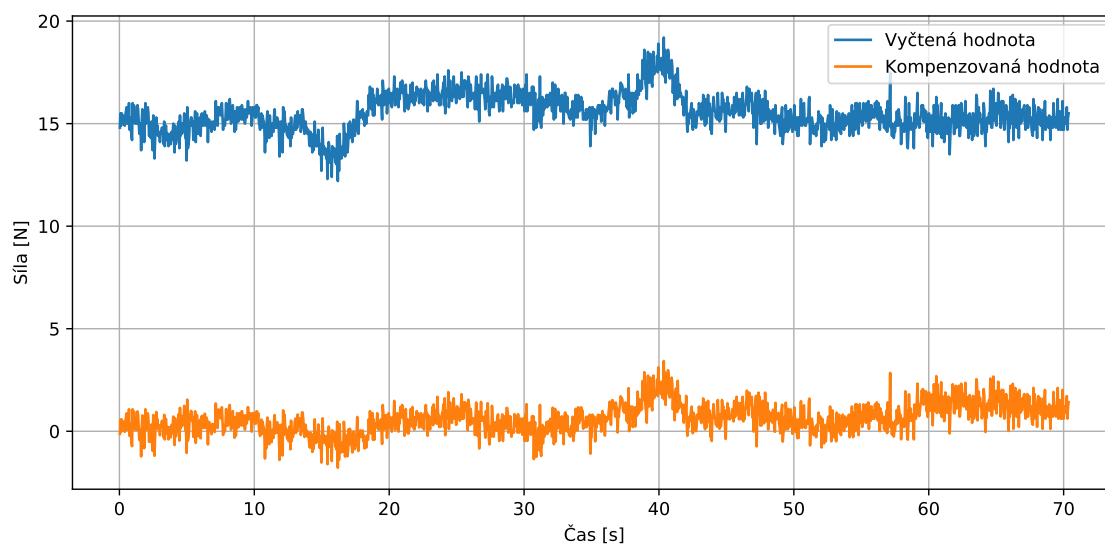
Výsledné vykompenzované veličiny jsou znázorněny v grafech 5.3, 5.4 a 5.5. Pro urychlení výpočtu byl použit každý 15. vzorek.



Obr. 5.3: Srovnání vyčtené a kompenzované hodnoty na ose X



Obr. 5.4: Srovnání vyčtené a kompenzované hodnoty na ose Y



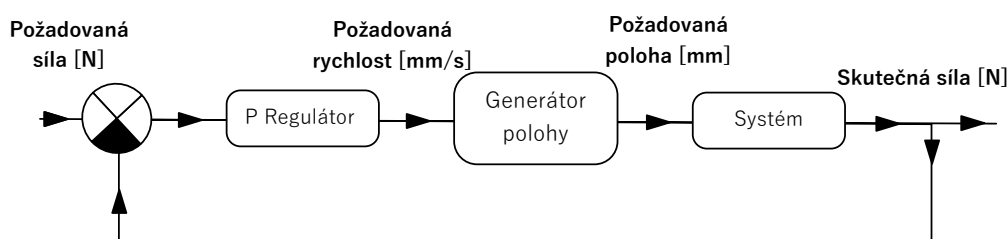
Obr. 5.5: Srovnání vyčtené a kompenzované hodnoty na ose Z

5.2 Působení požadovanou silou

Prvním implementovaným algoritmem je algoritmus pro působení požadovanou silou. Ten najde využití v mnoha různých aplikacích – například povrchových úpravách materiálů, nebo bezpečné manipulaci s křehkými objekty.

Vzhledem k dané úloze – regulace síly na požadovanou hodnotu – je vhodné použít regulátor pro docílení žádaného efektu. Pro zlepšení provozních vlastností bylo provedeno několik modifikací klasického regulačního algoritmu – tyto modifikace jsou popsány v následujících sekcích.

Celkové schéma tohoto řídicího algoritmu je možno nalézt na obrázku 5.6.



Obr. 5.6: Schéma řídicího algoritmu pro působení požadovanou silou

5.2.1 Generátor polohy

Struktura a výstupy generátorů poloh byly blíže popsány v sekci 3.1.1. Pro správnou funkcionalitu byl zvolen generátor poloh v rychlostním režimu, který plní dvě následující funkce:

1. Funguje jako tzv. *Set Point filter* – tzn. omezuje rychlost změny regulované veličiny a tím vyhlazuje průběh rychlosti a polohy. Tím se omezí vlivy některých nelinearit systému (mechanická omezení zrychlení a rychlosti pohybu).
2. Převádí rychlostní veličinu na polohovou, s kterou pak dále může pracovat řídicí systém.

Z důvodů aktualizace žádané rychlosti během každého cyklu programu není možné použít jinou akcelerační rampu než lineární (při změně žádané rychlosti se přepočítá celý rychlostní profil a při harmonickém začátku akcelerace je v prvním cyklu zrychlení prakticky nulové).

Využívaný řídicí systém TG Motion již obsahuje rozhraní pro výpočet generátoru poloh, nicméně při jeho použití je výsledek k dispozici až jeden cyklus programu po nastavení vstupních veličin – to zanáší nežádoucí zpoždění, které má u současné verze robota celé 3 ms.

Pro vyvarování se tomuto zpoždění je duplikován kód generátorů poloh z řídicího systému do obsluhujícího PLC programu, kde je možné generátory poloh spouštět nezávisle na cyklech programu.

5.2.2 Regulátor

Pro regulaci byl navrhnut prostý proporcionální regulátor.

Při přidání integrátoru dochází k destabilizaci systému, protože integrační složku již obsahuje generátor poloh (přepočet rychlosti na polohu). Tudíž se integrační složka v regulátoru nepoužívá.

Značný šum ve zpětné vazbě způsobuje, že derivační složka nemá pozitivní vliv na vlastnosti regulátoru ani při nízkých hodnotách derivační konstanty.

Výstup regulátoru je zachycen v rovnici 5.9.

$$x = (w - y)K_p \quad (5.9)$$

Kde:

x = Akční zásah vystupující z regulátoru [m/s]

w = Požadovaná hodnota síly [N]

y = Aktuální hodnota síly [N]

K_p = Zesílení proporcionální složky regulátoru [(m/s)/N]

Konstanta proporcionální složky regulátoru

Optimální hodnota konstanty proporcionální složky regulátoru je daná danou aplikací a závisí na mnoha faktorech, mezi něž patří následující:

- Hodnota síly, kterou se působí.
- Požadovaná rychlost a přesnost regulace.
- Rychlost projetí trajektorie, kterou robot vykonává.
- Tvrdost povrchu, na který se působí.
- Nepřesnosti opracovaného povrchu (zvlnění, nepřesné uložení).

Z těchto důvodů není možné určit univerzálně použitelnou hodnotu konstanty a je vždy pro danou aplikaci potřeba odborným odhadem nebo experimentálně hodnotu získat.

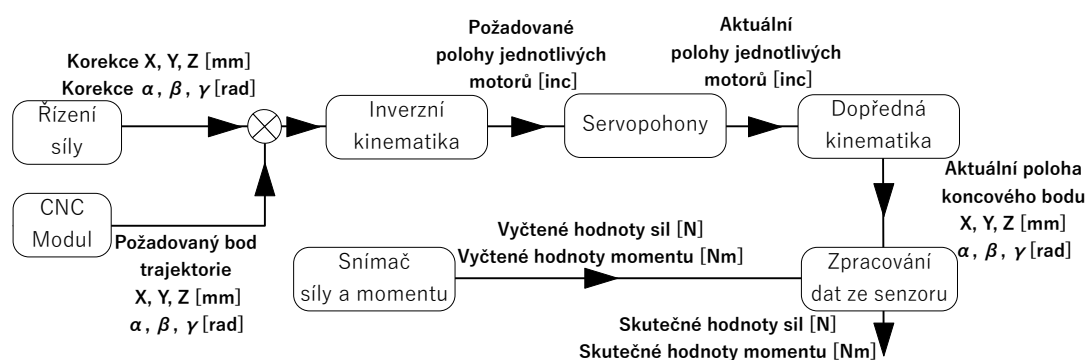
5.2.3 Systém

Na schématu 5.6 se systémem myslí několik následujících částí:

1. Modul PLC programu, který transformuje polohu koncového bodu do jednotlivých poloh daných motorů a naopak.

2. Část systému TG Motion, která posílá požadovanou polohu jednotlivým motorům a vyčítá jejich aktuální polohy.
3. Část systému TG Motion, která vyčítá aktuální hodnoty sil a momentů z připojeného snímače.
4. CNC modul TG Motionu, který zajišťuje projíždění G-Kódem definovaných trajektorií tím, že generuje aktuální koncové body, kam by robot měl jet.
5. Numerické zpracování vyčtených hodnot ze snímače, které je blíže popsáno v sekci 5.1.

Vzájemné vazby těchto částí jsou znázorněny na obrázku 5.7.



Obr. 5.7: Schéma systému

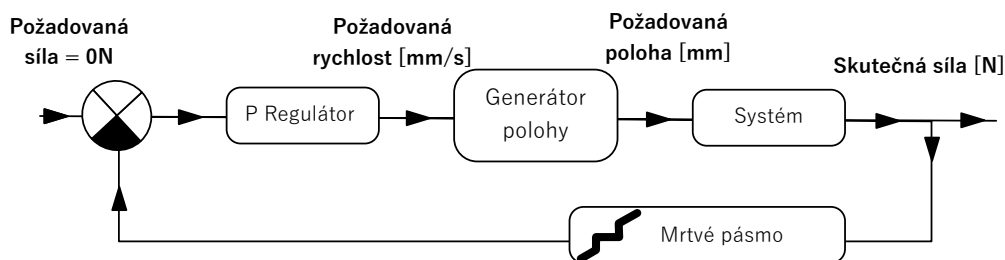
5.3 Ruční navádění

Druhým implementovaným algoritmem adaptivního řízení je algoritmus, který umožňuje ruční navádění efektoru robota. Ten spočívá v regulaci snímané síly na nulovou hodnotu – tím se docílí toho, že se robot pohybuje se směrem působení síly a tím pádem se s ním dá intuitivně pohybovat.

V ideálním případě by se dal použít totožný algoritmus jako pro působení požadovanou silou, který je popsán v předešlé kapitole 5.2. Nicméně v reálných podmínkách se nikdy snímaná hodnota síly neustálí na absolutně nulové hodnotě, a proto by robot kmital kolem koncového bodu, nebo při nepřesném kompenzování všech jevů by samovolně ujížděl.

Pro zabránění těmto nežádoucím jevům bylo do zpětné vazby zavedeno tzv. mrtvé pásmo.

Výsledný algoritmus je znázorněn na obrázku 5.8.



Obr. 5.8: Schéma řízení volného pohybu

5.3.1 Mrtvé pásmo

Mrtvé pásmo (pásmo necitlivosti, deadband) je označení pro přenosovou funkci, která je popsána rovnicí 5.10.

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{jestliže } x \in (T_d, T_h) \\ x, & \text{jinak} \end{cases} \quad (5.10)$$

Kde:

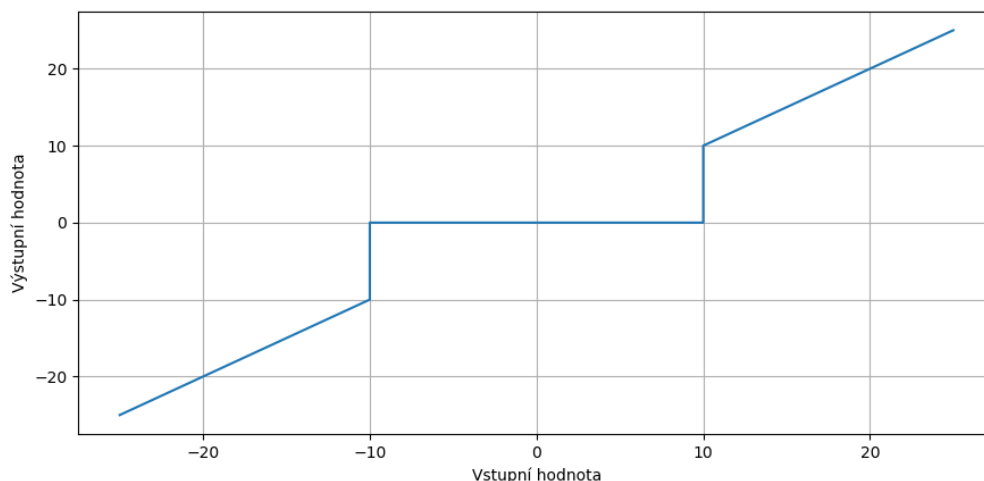
x = vstupní hodnota

T_h = Horní práh mrtvého pásma

T_d = Dolní práh mrtvého pásma

Mrtvé pásmo v tomto algoritmu zabraňuje samovolnému pohybu při nepřesném vyhodnocení měřených sil – ať už způsobených šumem na senzoru, nebo nepřesné kalibraci kompenzací sil.

Vzhledem k zašumění snímače byly pro zachování bezpečnosti obsluhy prahové hodnoty mrtvého pásma stanoveny na -10N a +10N. Přenosová funkce tohoto mrtvého pásma je znázorněna na obrázku 5.9.



Obr. 5.9: Přenosová funkce mrtvého pásma s prahy -10, 10

5.3.2 Regulátor

Konstanta proporcionální složky regulátoru

Oproti algoritmu pro působení žádanou silou je možno stanovit konstantu regulátoru univerzálně pro daného robota – působící síla bude řádově vždycky stejná.

Pro ruční pohyby byla konstanta proporcionální složky navrhována s ohledem na uživatelský komfort – tzn. aby se robot pohyboval při cíleném silovém působení bez vynaložení velkého úsilí, ale zároveň aby nedocházelo k překmitům.

Po osobním testování byla konstanta stanovena na 5 (mm/s)/N.

Nicméně vzhledem k této konstantě a zavedenému mrtvému pásmu je nejnižší povolená rychlost robota v režimu ručního navádění 50 mm/s. To ale může být příliš mnoho pro jemné a přesné pohyby. Při snížení konstanty, a tedy i rychlosti naopak klesá uživatelský komfort a pro rychlejší pohyby robota je potřeba vynaložit velké úsilí.

Jako vylepšení do budoucích verzí robota by tedy bylo vhodné tuto konstantu měnit, například otočným potenciometrem, v předem daném rozmezí, např. 0-100 % z dané hodnoty. To by zajistilo možnost robustně, ručně navádět robota rychle na hrubé pohyby, ale i přesně na ty velice jemné.

5.4 Rozhraní pro ovládání

Aby se dalo výše popsané funkce využít v uživatelských programech, bylo potřeba navrhnout funkční rozhraní.

Jak již bylo zmíněno, v současné podobě je možné robot řídit z G-Kódu – proto popsané funkční rozhraní taktéž odpovídá G-Kódovým značením (funkce jsou popsány číslem, parametry písmenem).

5.4.1 Udržování síly

Základní funkcí pro interakci s adaptivním řízením je funkce pro udržování konstantní působící síly.

Funkční kódy

M80 = Udržování síly v souřadnicích robota

M81 = Udržování síly v souřadnicích efektoru

M105 = Přerušení udržování síly

Parametry

X = Požadovaná působící síla v ose X [N]

Y = Požadovaná působící síla v ose Y [N]

Z = Požadovaná působící síla v ose Z [N]

I = Zesílení rychlostního regulátoru v ose X [(mm/s)/N]

J = Zesílení rychlostního regulátoru v ose Y [(mm/s)/N]

K = Zesílení rychlostního regulátoru v ose Z [(mm/s)/N]

A = Max. zrychlení v ose X [mm/s²]

B = Max. zrychlení v ose Y [mm/s²]

C = Max. zrychlení v ose Z [mm/s²]

U = Max. rychlost v ose X [mm/s]

V = Max. rychlost v ose Y [mm/s]

W = Max. rychlost v ose Z [mm/s]

Výchozí hodnoty parametrů

X, Y, Z = Bez uvedení požadované hodnoty se v dané ose síla neudržuje

I, J, K = 1 (mm/s)/N

A, B, C = 50 mm/s²

U, V, W = 10 mm/s

5.4.2 Aplikování síly

Funkce pro aplikování požadované síly slouží k nastavení požadované síly a počkání, dokud se této síly nedosáhne. Toho se využívá např. při navození prvního kontaktu robotu s materiálem.

Po splnění podmínek ve všech navolených osách daných parametry (např. pro osu X $F_X \in < X - D, X + Q >$) se spustí časovač, po jehož ukončení se funkce ukončí. Při přerušení splnění podmínek se časovač resetuje.

Se zadáním nulového parametru času se časování přeskočí a funkce se při splnění podmínek okamžitě ukončí.

Funkční kódy

M100 = Aplikování síly v souřadnicích robota

M101 = Aplikování síly v souřadnicích efektoru

Parametry

X = Požadovaná působící síla v ose X [N]

Y = Požadovaná působící síla v ose Y [N]

Z = Požadovaná působící síla v ose Z [N]

I = Zesílení rychlostní regulátoru v ose X [(mm/s)/N]

J = Zesílení rychlostní regulátoru v ose Y [(mm/s)/N]

K = Zesílení rychlostní regulátoru v ose Z [(mm/s)/N]

A = Max. zrychlení v ose X [mm/s²]

B = Max. zrychlení v ose Y [mm/s²]

C = Max. zrychlení v ose Z [mm/s²]

U = Max. rychlost v ose X [mm/s]

V = Max. rychlost v ose Y [mm/s]

W = Max. rychlost v ose Z [mm/s]

D = Povolený rozdíl od žádané hodnoty v záporném směru pro osu X [N]

E = Povolený rozdíl od žádané hodnoty v záporném směru pro osu Y [N]

G = Povolený rozdíl od žádané hodnoty v záporném směru pro osu Z [N]

Q = Povolený rozdíl od žádané hodnoty v kladném směru pro osu X [N]

R = Povolený rozdíl od žádané hodnoty v kladném směru pro osu Y [N]

S = Povolený rozdíl od žádané hodnoty v kladném směru pro osu Z [N]

T = Čas, po který musí být dané podmínky splněny, než se funkce ukončí [ms]

Výchozí hodnoty parametrů

X, Y, Z = Bez uvedení požadované hodnoty se v dané ose síla neaplikuje

I, J, K = 1 (mm/s)/N

A, B, C = 50 mm/s²

U, V, W = 10 mm/s

D, E, G = 0.1 N

Q, R, S = 0.1 N

T = 0 ms

5.4.3 Nastavení aktuálních sil

Tato funkce zajišťuje změnu aktuální působící síly. Toho se dá využít například pro vynulování aktuálních hodnot, když není senzor zatížen, což zpřesní měření působících sil.

Funkční kódy

M120 = Nastavení aktuálních sil v souřadnicích robota

M121 = Nastavení aktuálních sil v souřadnicích efektoru

M125 = Zrušení předchozích offsetů

Parametry

X = Nová síla v ose X [N]

Y = Nová síla v ose Y [N]

Z = Nová síla v ose Z [N]

Výchozí hodnoty parametrů

$X, Y, Z = 0\text{N}$

5.4.4 Nastavení limitů korekce

Aby se zabránilo nežádoucímu vyjetí z trajektorie robota, je možné omezit maximální možnosti korekce, pokud by byla hodnota korekce překročena, robot okamžitě přeruší projíždění aktuální trajektorie.

Pro programátorský komfort je možné limity zadávat relativně k současné hodnotě korekce, to znamená, že pokud trajektorie již byla upravena, aktuální bod je vnímán jako na trajektorii a nové limity se vztahují k němu.

Funkční kódy

M130 = Nastavení maximálních hodnot korekce v souřadnicích robota

M136 = Nastavení maximálních hodnot korekce v souřadnicích robota,
relativně k současné hodnotě korekce

M140 = Nastavení minimálních hodnot korekce v souřadnicích robota

M146 = Nastavení minimálních hodnot korekce v souřadnicích robota,
relativně k současné hodnotě korekce

Parametry

X = Limit korekce v ose X [mm]

Y = Limit korekce v ose Y [mm]

Z = Limit korekce v ose Z [mm]

Výchozí hodnoty parametrů pro funkci M130

$X, Y, Z = 10\text{mm}$

Výchozí hodnoty parametrů pro funkci M141

$X, Y, Z = -10\text{mm}$

5.4.5 Omezení sil

Pro bezpečnou práci robota je možno omezit působení jeho sil, při překročení některé ze zadaných sil robot okamžitě přeruší projíždění aktuální trajektorie.

Funkční kódy

M150 = Omezení maximálních sil v souřadnicích robota

M155 = Vypnutí omezení maximálních sil

M160 = Omezení minimálních sil v souřadnicích robota

M161 = Vypnutí omezení minimálních sil

Parametry

X = Limitní síla v ose X [N]

Y = Limitní síla v ose Y [N]

Z = Limitní síla v ose Z [N]

Výchozí hodnoty parametrů

X, Y, Z = Bez uvedení požadované hodnoty se v dané ose síla neomezuje

6 Otestování na aplikaci

Pro ověření funkčnosti algoritmů popsanych v předchozích kapitolách byla navrhnutá testovací aplikace kreslení na papír – v různých modifikacích, které demonstrují výhody použití vytvořeného řízení.

6.1 Referenční snímač

Pro ověření působení sil byla použita váha CAS EC.

Váha disponuje měřícím rozsahem 3 kg, což odpovídá působícím silám přibližně 30 N. Nicméně při přetížení hrozí permanentní poškození váhy, což se muselo zohlednit při volbě testovacích aplikací.

Váha poskytuje rozlišení 0,1 g, což přibližně odpovídá působící gravitační síle 0,001 N. To je o několik řádů vyšší rozlišení, než má snímač použitý na robotu.

6.1.1 Komunikace

Váha je vybavena komunikačním rozhraním RS-232 pomocí kterého je možné vyčítat aktuální hodnotu měřené váhy (síly). Jelikož výrobce neposkytuje žádný software, který by to uměl, bylo potřeba vytvořit jednoduchý program. [14]

Při správném nastavení váha sama posílá přibližně 5 vzorků za sekundu. Vytvořený program tedy na zvolené sériové lince naslouchá, z přijatých dat vyčítá hodnoty aktuální měřené váhy a s časovým údajem ukládá do souboru.

Program je zachycen na obrázku 6.1.

Obr. 6.1: Program pro vyčítání hodnot z váhy CAS EC.

6.1.2 Zpracování hodnot

Jelikož výstupní veličinou váhy je hmotnost, pro přepočtení na sílu je potřeba použít rovnici 6.1.

Jelikož nejistota způsobená nepřesnou hodnotou gravitačního zrychlení je zanedbatelná s ostatními nejistotami měření pomocí dané váhy, je použita hodnota gravitačního zrychlení $g = 9,81ms^{-2}$.

$$F = mg \quad (6.1)$$

Kde:

F_G = Hodnota působící síly [N]

m = Měřená hmotnost [kg]

g = Gravitační zrychlení [ms^{-2}]

Synchronizace průběhů

Průběhy hodnot ze snímače a váhy nejsou vyčítané z jednoho systému a tím pádem nesdílí časovou osu (ať už počátkem, tak i periodou vzorkování). A proto nejsou v surovém tvaru vhodné pro porovnání průběhů.

Kvůli počtu průběhů, které se musí synchronizovat, je žádoucí tuto synchronizaci dělat strojevě.

Prvním vyzkoušeným způsobem synchronizace bylo převzorkování signálu z váhy a následné hledání maximální vzájemné korelace mezi převzorkovaným signálem a

signálem systému. Nicméně tato metoda se neukázala jako vhodná, jelikož maximum korelace pro daná data neodpovídá žádanému offsetu, a to ani pro normovaná data.

Výsledná použitá synchronizace je postavená na heuristice, která vychází z tvaru signálů. Tato heuristika spočívá v hledání významných bodů v obou signálech a nalezení jejich časových rozdílů.

Prvním použitým významným bodem je začátek působení síly, který je definovaný jako změna aktuální hodnoty síly o více než 8 % maximální hodnoty v určitém časovém intervalu (15ms). Nicméně tento významný bod není možno použít pro signály s pozvolnou změnou signálu.

Tudíž bylo potřeba využít druhý významný bod, který odpovídá špičkové hodnotě síly v oblasti, kde se vykonává pohyb.

Posledním vypočítávaným pravidlem je časový rozdíl v řádu stovek milisekund, a tudíž se hledá minimum z časových rozdílů významných bodů, které je použito jako offset pro synchronizaci signálů.

Tato synchronizace sice není univerzální, ale na dané průběhy je dostačující.

6.2 Působení požadovanou silou – kreslení na papír

6.2.1 Použité programy

Pro testování byl použit jednoduchý program, který popisuje čtverec se zaoblenými rohy. Výchozí poloha robota je 1 cm nad bodem působení.

Pro zpřesnění měření je před začátkem pohybu, kdy na robotický snímač nepůsobí žádné síly, provedeno vynulování měřených hodnot pomocí M-Funkce 120 (viz sekce 5.4.3).

Kvůli nebezpečí zničení referenčního snímače je do programu zavedeno omezení působících sil pomocí M-Funkce 150 (viz sekce 5.4.5), které zajistí zastavení pohybů robota při překročení limitní síly.

Všechny použité programy je možné nalézt na přiloženém datovém nosiči (viz kapitola C) a jejich ukázky je možné nalézt v příloze – kapitola B.

Počáteční stav

Aby bylo možno srovnat průběh síly bez jejího řízení s průběhem síly s jejím řízením, je nutno docílit toho, že i bez řízení sil bude robot působit požadovanou silou (alespoň na počátku pohybu).

Toho je docíleno pomocí následujících kroků:

1. Ruční najetí do polohy, v níž referenční snímač ukazuje váhu, která odpovídá požadované síle.

2. Pohyb nahoru o 1 cm.

Program s řízením síly

Jelikož je žádoucí, aby robot působil žádanou silou již od počátku pohybu, je při příjezdu propisky k papíru využita M-Funkce 100 (viz sekce 5.4.2), která zajistí pokračování programu až při dosažení požadované síly.

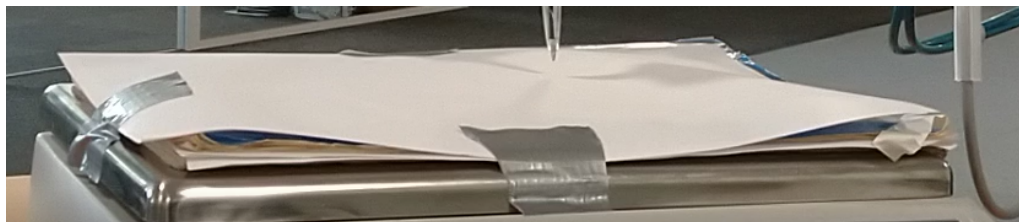
Pomocí této funkce je také možno eliminovat překročení požadované síly na začátku pohybu při příjezdu robota k papíru tím, že se koncová část příjezdu vykonává touto funkcí namísto prostého lineárního pohybu.

Samotné řízení je poté aktivováno pomocí M-Funkce 80 (viz sekce 5.4.1).

6.2.2 Použité podložky

Měkká podložka

První testovací aplikací je kreslení na papír, který je položen na měkké podložce – konkrétně sešitu, který je zachycen na obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Použitá měkká podložka – sešit.

Zvlněná podložka

Druhým typem podložky demonstrující výhody silového řízení je podložka se zvlněným povrchem. Toho je docíleno pomocí vytvarování několika vln v oblasti, kde se bude obraz kreslit.

Vlny mají různé výšky v řádu jednotek milimetrů. Podložka je zachycena na obrázku 6.3.



Obr. 6.3: Zvlněná podložka.

Nakloněná rovina

Posledním typem podložky je nakloněná rovina. Ta je vytvořena podepřením jedné strany krytu referenční váhy, na kterou se použitý papír pokládá, jak je znázorněno na obrázku 6.4.



Obr. 6.4: Nakloněná rovina.

6.2.3 Použitý papír

Pro testování malých působících sil byl použit klasický kancelářský papír s gramáží $80g/m^2$. Nicméně při působení sil blízkých se 10 N dochází k protržení papíru a ovlivnění měření. Proto bylo nutno pro měření s většími působícími silami použít tvrdší papír, konkrétně s gramáží $250g/m^2$.

Nicméně i použitý tvrdší papír se při působení sil blízkých 20 N protrhává, a tudíž bylo potřeba omezit měření na menší síly.

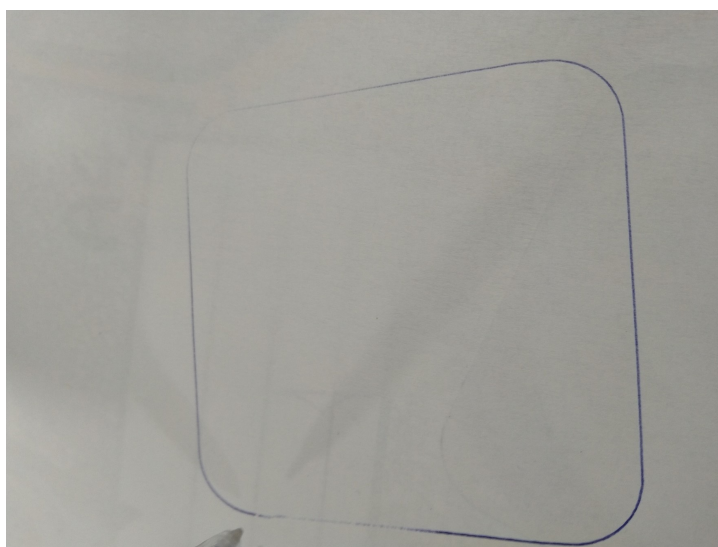
Zvlněná podložka způsobuje mnohem snazší protrhnutí papíru, a tak je potřeba použít tvrdý papír i při působení malých sil.

6.2.4 Měkká podložka

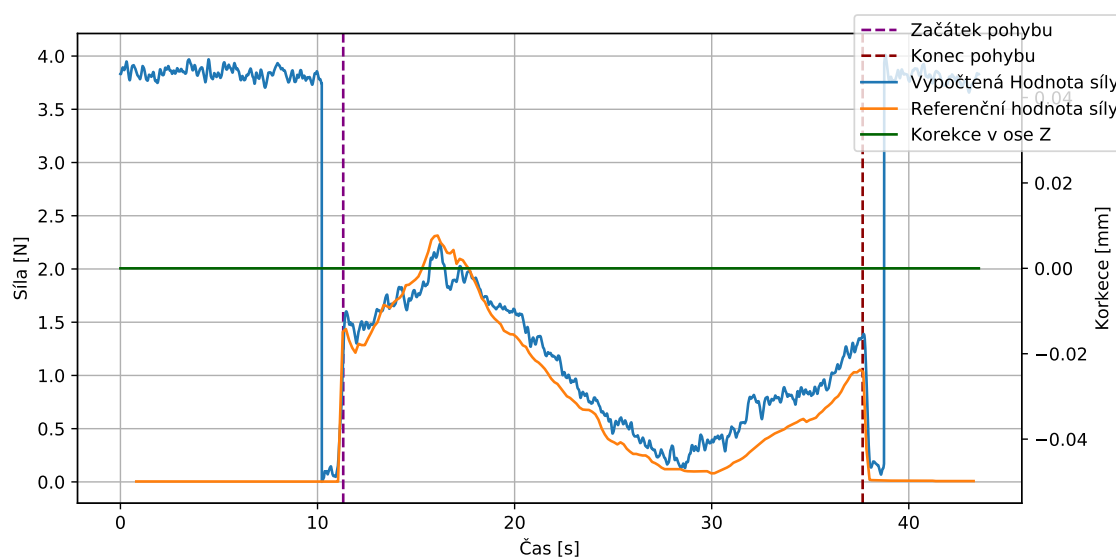
Požadovaná síla 1 N bez řízení síly

Jak je vidno z obrázku 6.5, bez řízení síly má výsledný obraz nedostatky způsobené nestálou působící silou. Pravý dolní okraj je výraznější oproti zbytku obrazu, zatímco levý horní roh je téměř neviditelný.

To dokládají i průběhy sil zobrazené v grafu 6.6, kde pravý dolní roh odpovídá překročení síly o více než 100 % z požadované hodnoty a levý horní roh naopak poklesu pod 15 % z žádané hodnoty.



Obr. 6.5: Výsledek kreslení silou 1 N bez řízení síly.



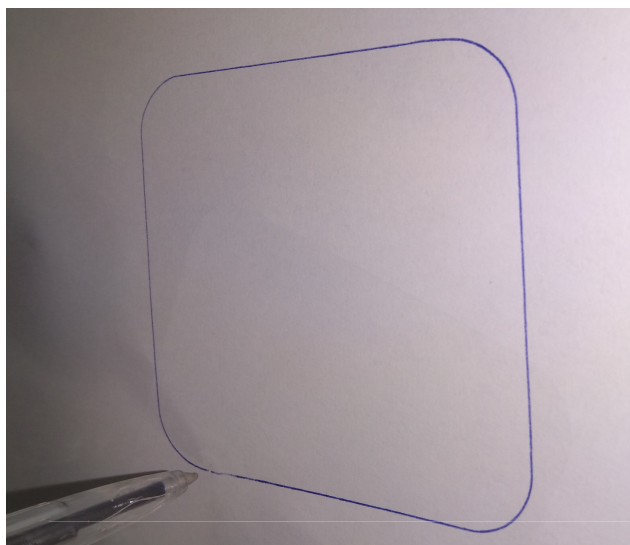
Obr. 6.6: Průběh působících sil pro kreslení silou 1 N bez řízení síly

Požadovaná síla 1 N s řízením síly, zesílení regulátoru $K = 1.5 \text{ (mm/s)/N}$

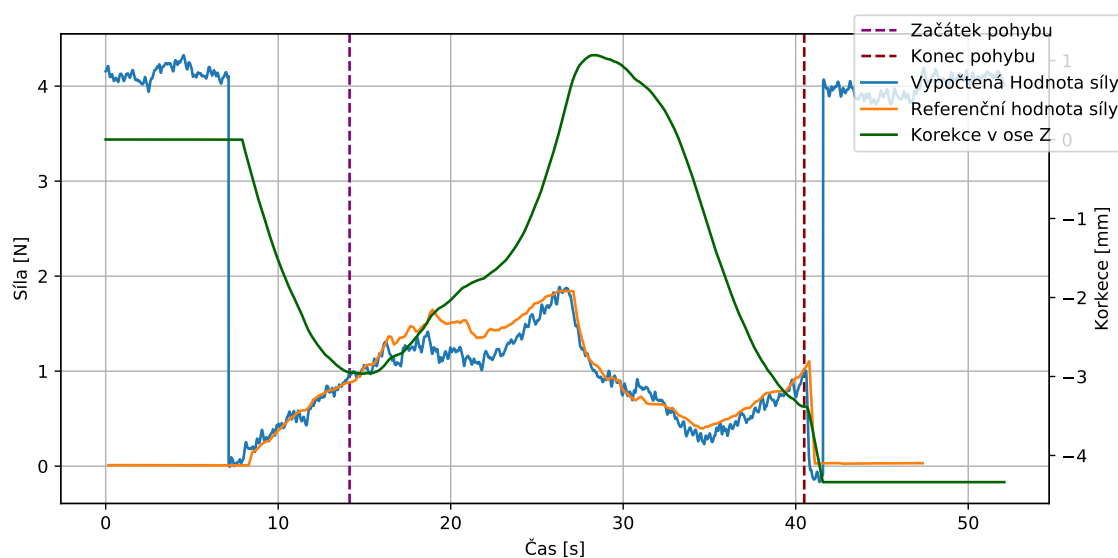
Jak je vidno na obrázku 6.7 oproti kreslení bez řízení je obraz celistvější a více rovnoměrně nakreslený.

Nicméně v průběhu sil zachyceném v grafu 6.8 je možno vidět stále se vyskytující překročení žádané síly o více než 75 % z žádané hodnoty, následovaný propadem na přibližně 30 % z žádané hodnoty.

To je způsobeno regulátorem síly, jehož proporcionální zesílení má příliš velkou hodnotu.



Obr. 6.7: Výsledek kreslení silou 1 N s řízením síly.

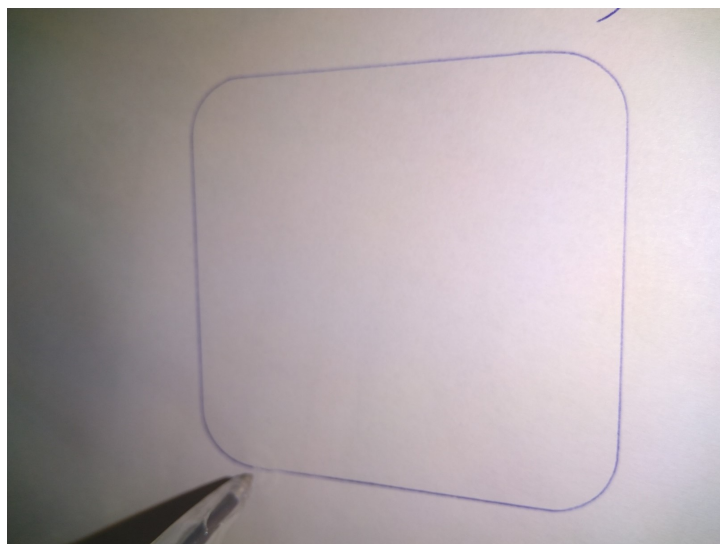


Obr. 6.8: Průběh působících sil pro silou 1 N s řízením síly.

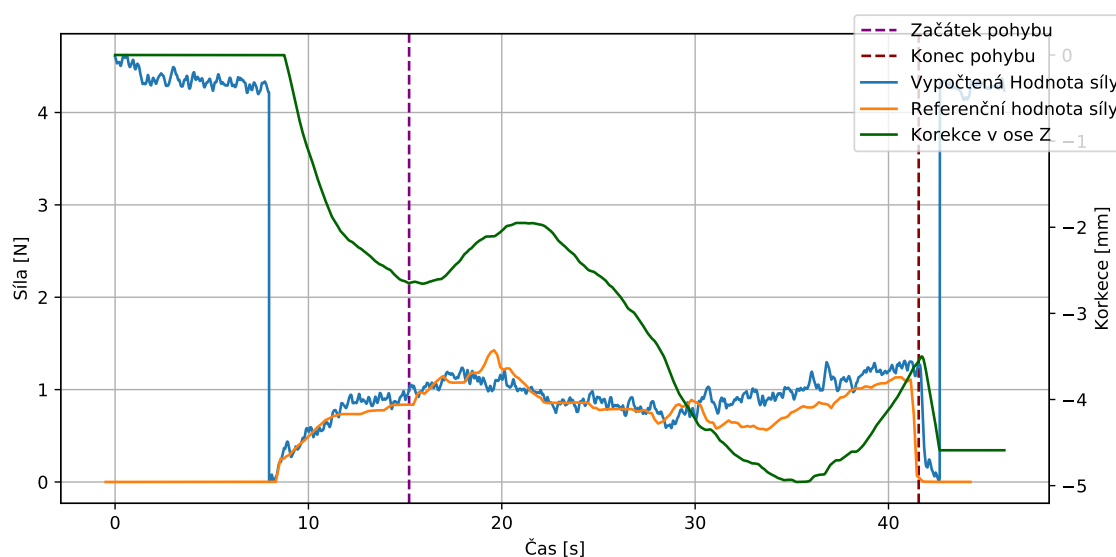
Požadovaná síla 1 N s řízením síly, zesílení regulátoru $K = 1.0 \text{ (mm/s)/N}$

Při snížení hodnoty proporcionálního zesílení je výsledný obraz, znázorněný v obrázku 6.9, bez jakékoliv viditelné chyby.

Průběh sil zachycený na obrázku 6.10 taktéž dokazuje, že odchylky od žádané hodnoty byly silně redukovány a již se neliší ani o 30 % od žádané hodnoty.



Obr. 6.9: Výsledek kreslení silou 1 N s řízením síly.

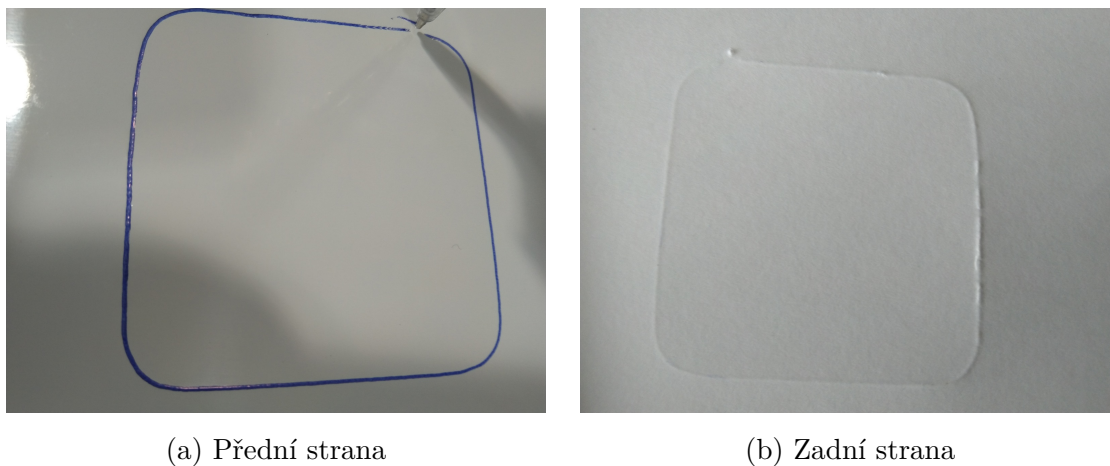


Obr. 6.10: Průběh působících sil pro kreslení silou 1 N s řízením síly.

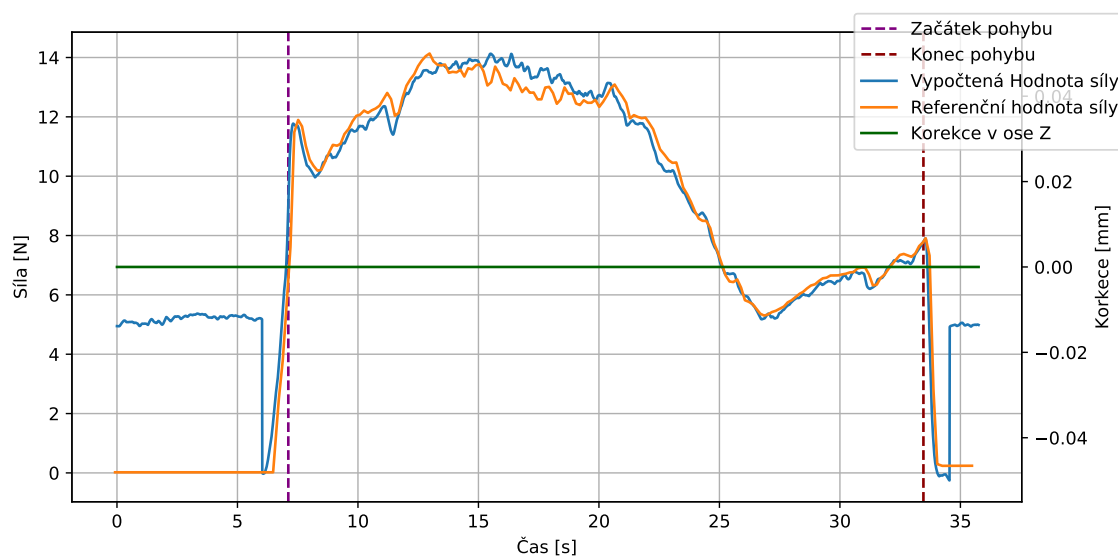
Požadovaná síla 10 N bez řízení síly

Při použití větší síly propiska pokryje inkoustem celou trajektorii pohybu i bez řízení síly (viz obr. 6.11), nicméně při bližším pohledu, obzvláště z druhé strany, je patrné, že síla nepůsobí rovnoměrně a v různých oblastech vytváří různě hluboké rýhy.

To je potvrzeno grafem 6.12, kde je vidět rozptyl působících sil od 5 do 14 N.



Obr. 6.11: Výsledek kreslení silou 10 N bez řízení síly.

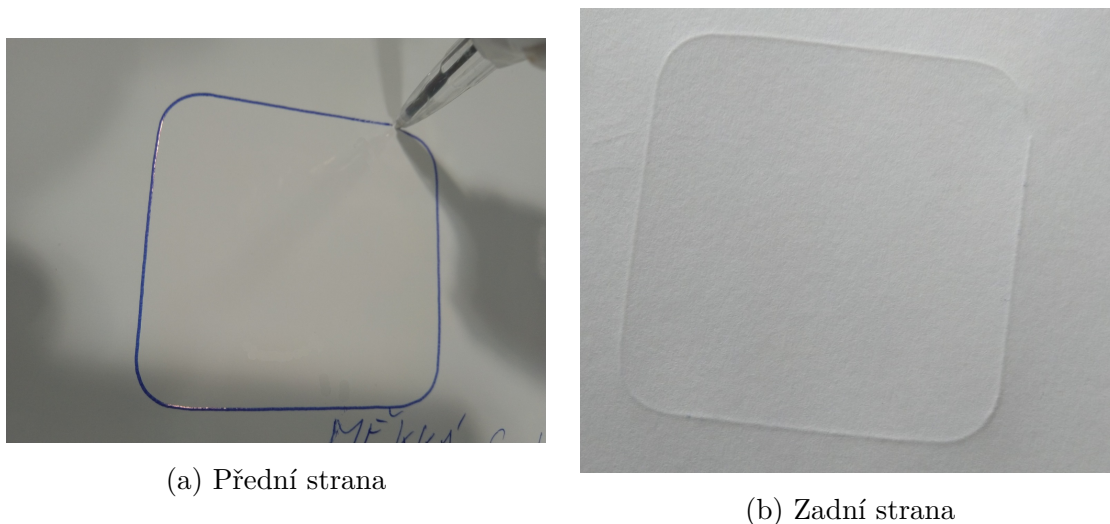


Obr. 6.12: Průběh působících sil pro kreslení silou 10 N bez řízení síly.

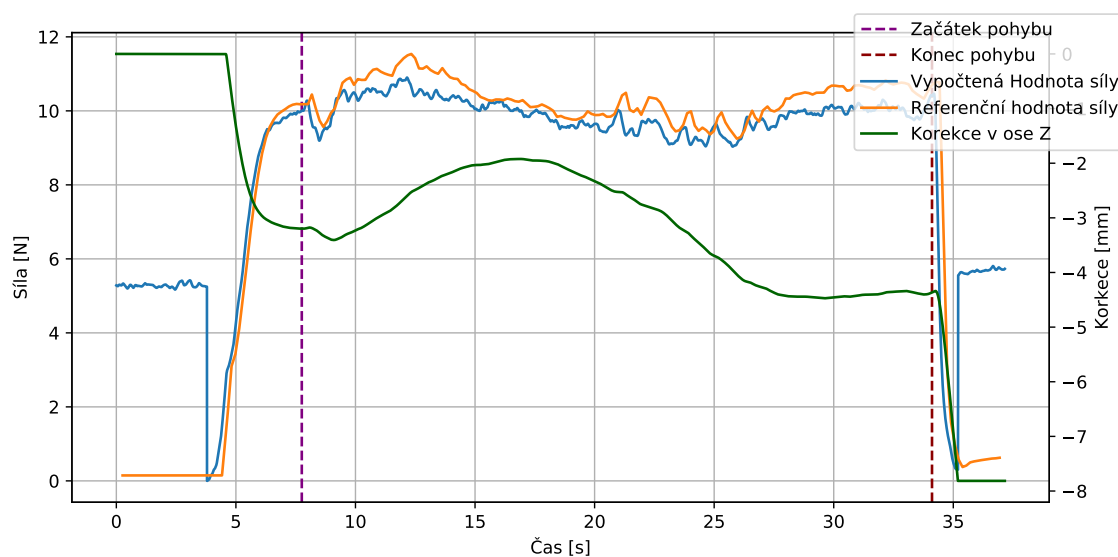
Požadovaná síla 10 N s řízením síly, zesílení regulátoru $K = 0.5 \text{ (mm/s)/N}$

Oproti neregulované variantě je z obrázku 6.13 zřejmé, že propiskou vyryté rýhy mají přibližně stejnou hloubku.

Z grafu 6.14 je patrné, že maximální hodnoty odchylky od žádané hodnoty síly se pohybují kolem hodnot $\pm 1 \text{ N}$, což je podstatně méně než u neregulované varianty.



Obr. 6.13: Výsledek kreslení s požadovanou působící silou 10 N s řízením síly.



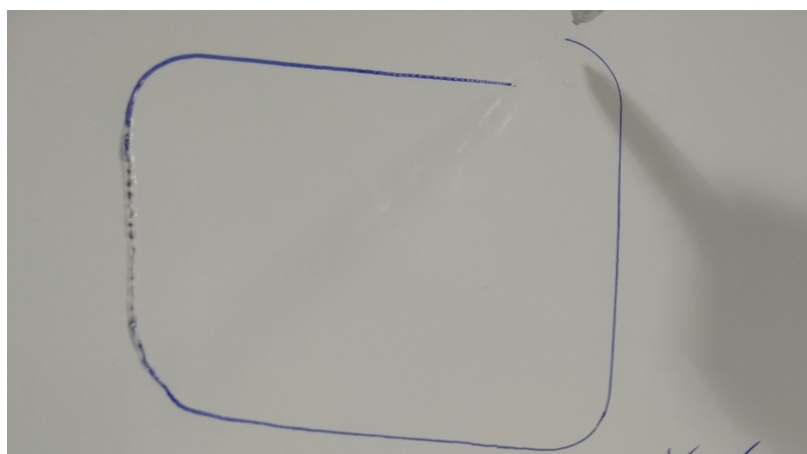
Obr. 6.14: Průběh působících sil pro kreslení silou 10 N s řízením síly.

6.2.5 Zvlněná podložka

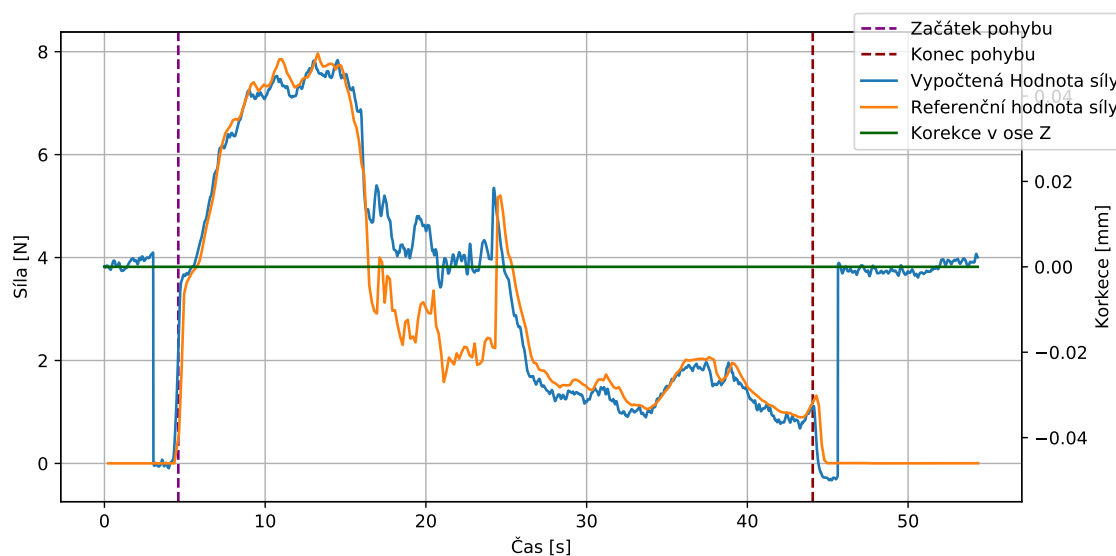
Požadovaná síla 3 N bez řízení síly

Jak je na první pohled z výsledného obrázku 6.15 patrné, bez řízení síly nelze docílit úspěšného nakreslení žádaného obrazce na zvlněném povrchu.

Při najetí na vlnu působí propiska dostatečnou silou pro protržení papíru, což má za následek to, že propiska uvízne v papíru a místo pohybu skrz papír pohybuje s celou měřicí soupravou (tudíž i váhou). To je také důvodem rozdílného úseku měření referenčního a robotového snímače zachyceného na obr. 6.16.



Obr. 6.15: Výsledek kreslení na zvlněném povrchu silou 3 N bez řízení síly.



Obr. 6.16: Průběh působících sil pro kreslení na zvlněnou podložku silou 3 N bez řízení síly.

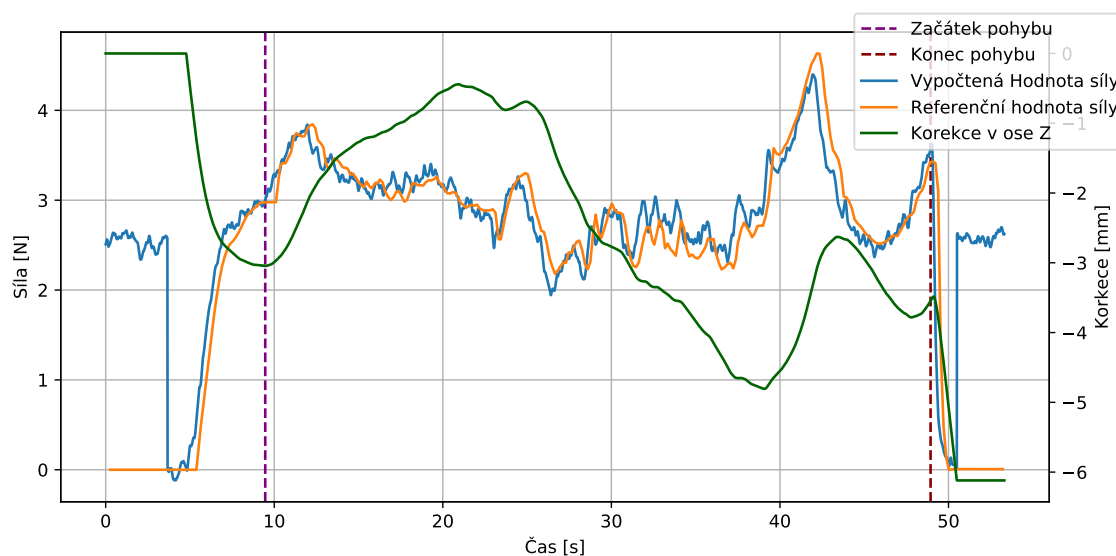
Požadovaná síla 3 N s řízením síly, zesílení regulátoru $K = 0.75 \text{ (mm/s)/N}$

Při použití algoritmu pro řízení síly se nevyskytují žádné problémy, které byly u neregulované varianty. Obrázek je i přes umístění papíru na zvlněný povrch bezproblémově, rovnoměrně nakreslen, což je možno vidět na obrázku 6.17.

Z grafu průběhu hodnot sil 6.18 je vidět, že oproti variantě s měkkým povrchem dochází k mnohem větším překročením žádané hodnoty, až k hodnotám 50 % z žádané síly.



Obr. 6.17: Výsledek kreslení na zvlněném povrchu s řízením síly.



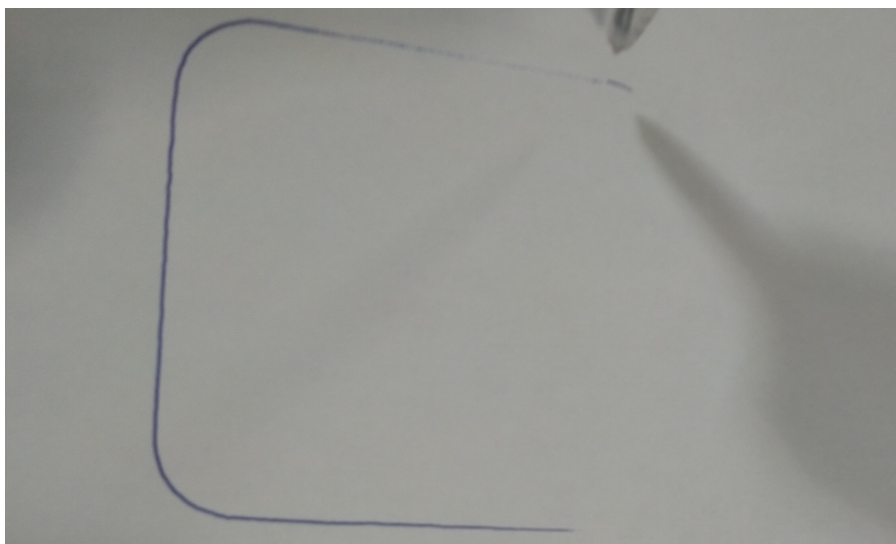
Obr. 6.18: Průběh působících sil pro kreslení na zvlněnou podložku silou 3 N s řízením síly.

6.2.6 Nakloněná rovina

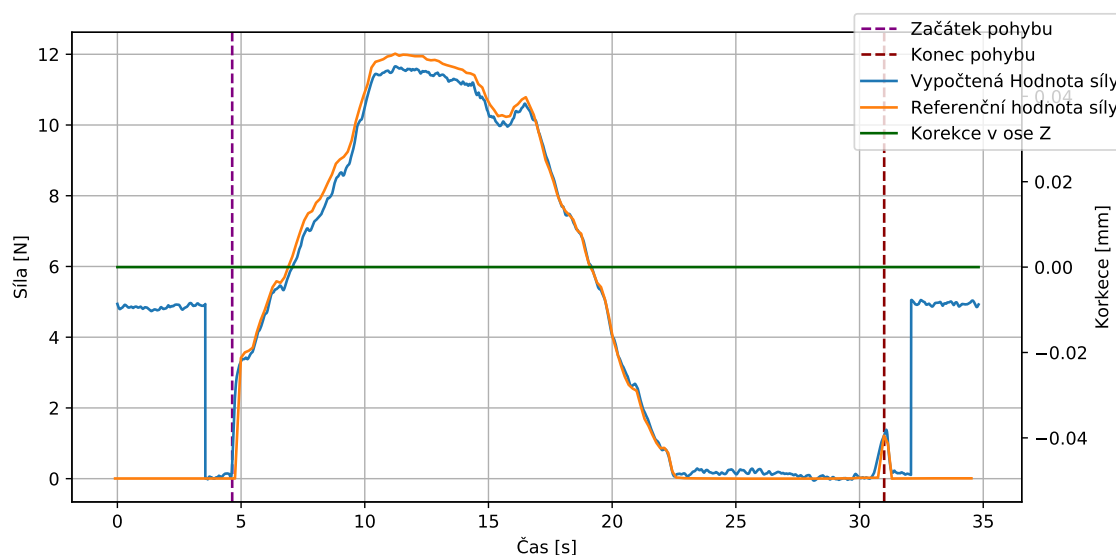
Požadovaná síla 2 N bez řízení síly

Jak je možno vidět na obrázku 6.19, bez řízení sil není robot schopný daný obrazec úspěšně nakreslit.

Jak je dokázáno průběhem hodnot 6.20, podle očekávání při pohybu do stoupání podložky síla roste nad žádanou mez. Při pohybu proti stoupání podložky naopak síla klesá až na nulové působící síly, což má za následek neúplnost kresleného obrazu.



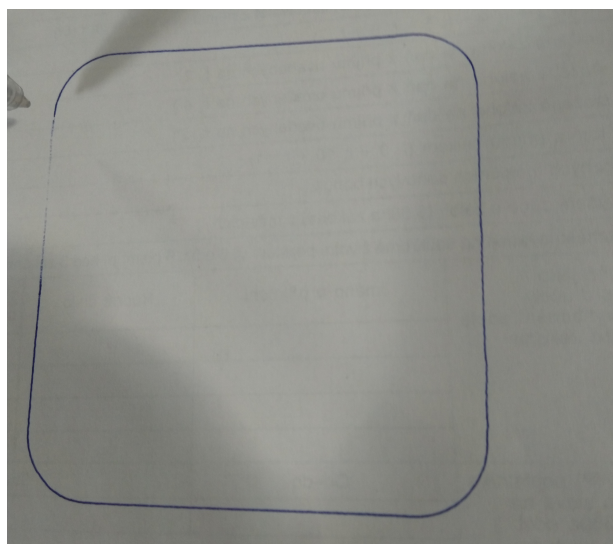
Obr. 6.19: Výsledek kreslení na nakloněné rovině silou 2 N bez řízení síly.



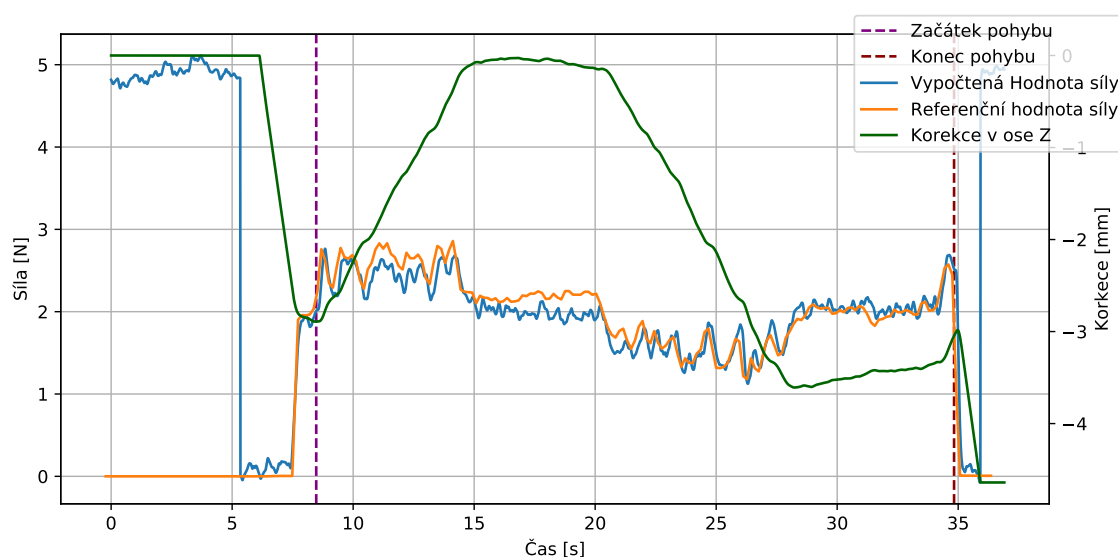
Obr. 6.20: Průběh působících sil pro kreslení na nakloněné rovině silou 2 N bez korekcí.

Požadovaná síla 2 N s řízením síly

Na obrázku 6.21 je možno vidět výsledný obrázek kreslení na nakloněné rovině s použitím řízení síly. Oproti variantě bez řízení sil je nakreslený obraz celistvý. Na počátku pohybu je nakreslená čára znatelně slabší, přitom podle průběhu sil znázorněném v grafu 6.22 bylo působení sil dokonce větší než požadované 2 N. Z toho lze odvodit, že příčinou nedokonalosti obrazce bude spíše rozepisování propisky než chyba regulace.



Obr. 6.21: Výsledek kreslení na nakloněné rovině silou 2 N s řízením síly.



Obr. 6.22: Průběh působících sil pro kreslení na nakloněné rovině silou 2 N s řízením síly.

6.2.7 Zhodnocení regulace síly

V tabulce 6.1 (relativně vztažené k žádané hodnotě v tabulce 6.3) jsou zobrazeny statické hodnoty popisující úspěšnost regulace z pohledu referenčního snímače, zatímco v tabulce 6.2 (relativně vztažené k žádané hodnotě v tabulce 6.4) jsou hodnoty vztažené vůči měření provedené robotickým systémem.

Z hodnot vyplývá, že ve většině případů jsou hodnoty z těchto dvou zdrojů sil velice podobné, a v ostatních případech je chyba způsobena externím vlivem, který je popsán v předchozích sekcích a ovlivňuje jenom jeden ze snímačů.

Dále se dá z tabulek vyčíst, že s rostoucími hodnotami požadované síly roste i relativní přesnost regulace, což je způsobeno tím, že při nižších hodnotách požadované síly se pracuje s hodnotami, které jsou blízké hodnotám šumu působícímu na snímač. Tento šum je amplitudou konstantní pro celý rozsah snímače, a tudíž nemá relativně takový vliv při vyšších měřených hodnotách.

Měření	Průměr [N]	σ^1 [N]	Max. odchylka [N]
Měkká podl. bez řízení 1 N	0.90	0.69	1.31
Měkká podl. s řízením 1 N, $K = 1.5 \text{ (m/s)/N}$	1.11	0.45	0.84
Měkká podl. s řízením 1 N, $K = 1.0 \text{ (m/s)/N}$	0.88	0.19	-0.44
Měkká podl. bez řízení 10 N	10.38	2.96	-4.70
Měkká podl. s řízením 10 N, $K = 0.5 \text{ (m/s)/N}$	10.33	0.52	1.54
Nakloněná podl. bez řízení 2 N	5.69	4.70	10.02
Nakloněná podl. s řízením 2 N, $K = 1.0 \text{ (m/s)/N}$	2.04	0.41	0.86
Zvlněná podl. bez řízení 3 N	3.41	2.36	4.97
Zvlněná podl. s řízením 3 N, $K = 0.75 \text{ (m/s)/N}$	2.98	0.52	1.63

Tab. 6.1: Tabulka statistických dat průběhů sil vyčtených z referenčního snímače

Měření	Průměr [N]	σ^1 [N]	Max. odchylka [N]
Měkká podl. bez řízení 1 N	1.07	0.57	1.24
Měkká podl. s řízením 1 N, $K = 1.5$ (m/s)/N	0.98	0.39	0.89
Měkká podl. s řízením 1 N, $K = 1.0$ (m/s)/N	0.98	0.16	-0.42
Měkká podl. bez řízení 10 N	10.23	3.02	-4.82
Měkká podl. s řízením 10 N, $K = 0.5$ (m/s)/N	9.91	0.42	-0.97
Nakloněná podl. bez řízení 2 N	5.25	4.50	9.66
Nakloněná podl. s řízením 2 N, $K = 1.0$ (m/s)/N]	1.99	0.36	-0.88
Zvlněná podl. bez řízení 3 N	3.58	2.37	4.84
Zvlněná podl. s řízením 3 N, $K = 0.75$ (m/s)/N]	2.98	0.45	1.40

Tab. 6.2: Tabulka statistických dat průběhů sil vyčtených z použitého snímače

Měření	Průměr [%]	σ^2 [%]	Max. odchylka [%]
Měkká podl. bez řízení 1 N	89.60	68.71	131.41
Měkká podl. s řízením 1 N, $K = 1.5$ (m/s)/N	110.75	45.36	84.33
Měkká podl. s řízením 1 N, $K = 1.0$ (m/s)/N	87.90	19.45	-43.78
Měkká podl. bez řízení 10 N	103.75	29.57	-46.99
Měkká podl. s řízením 10 N, $K = 0.5$ (m/s)/N	103.32	5.17	15.38
Nakloněná podl. bez řízení 2 N	284.66	234.90	500.89
Nakloněná podl. s řízením 2 N, $K = 1.0$ (m/s)/N]	102.00	20.36	42.88
Zvlněná podl. bez řízení 3 N	113.58	78.72	165.57
Zvlněná podl. s řízením 3 N, $K = 0.75$ (m/s)/N]	99.30	17.26	54.44

Tab. 6.3: Tabulka statistických dat průběhů sil vyčtených z referenčního snímače, relativně vztažených k žádané hodnotě.

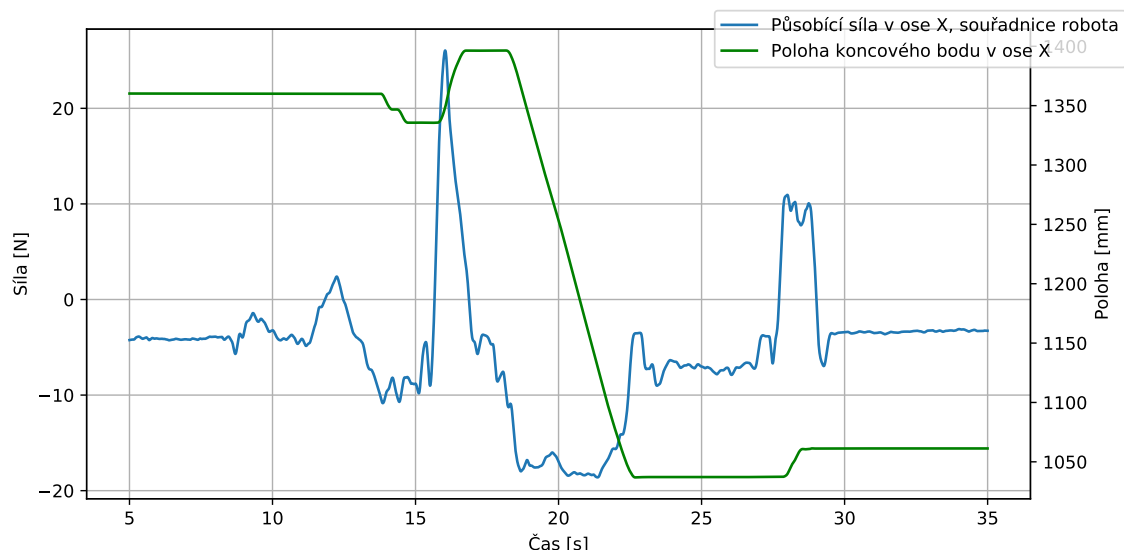
Měření	Průměr [%]	σ^1 [%]	Max. odchylka [%]
Měkká podl. bez řízení 1 N	107.35	56.51	123.55
Měkká podl. s řízením 1 N, $K = 1.5 \text{ (m/s)/N}$	98.35	39.29	88.64
Měkká podl. s řízením 1 N, $K = 1.0 \text{ (m/s)/N}$	97.72	15.84	-41.73
Měkká podl. bez řízení 10 N	102.33	30.17	-48.23
Měkká podl. s řízením 10 N, $K = 0.5 \text{ (m/s)/N}$	99.11	4.18	-9.67
Nakloněná podl. bez řízení 2 N	262.70	224.79	482.98
Nakloněná podl. s řízením 2 N, $K = 1.0 \text{ (m/s)/N}$	99.71	17.90	-43.83
Zvlněná podl. bez řízení 3 N	119.23	78.93	161.23
Zvlněná podl. s řízením 3 N, $K = 0.75 \text{ (m/s)/N}$	99.44	14.96	46.67

Tab. 6.4: Tabulka statistických dat průběhů sil vyčtených z použitého snímače, relativně vztažených k žádané hodnotě.

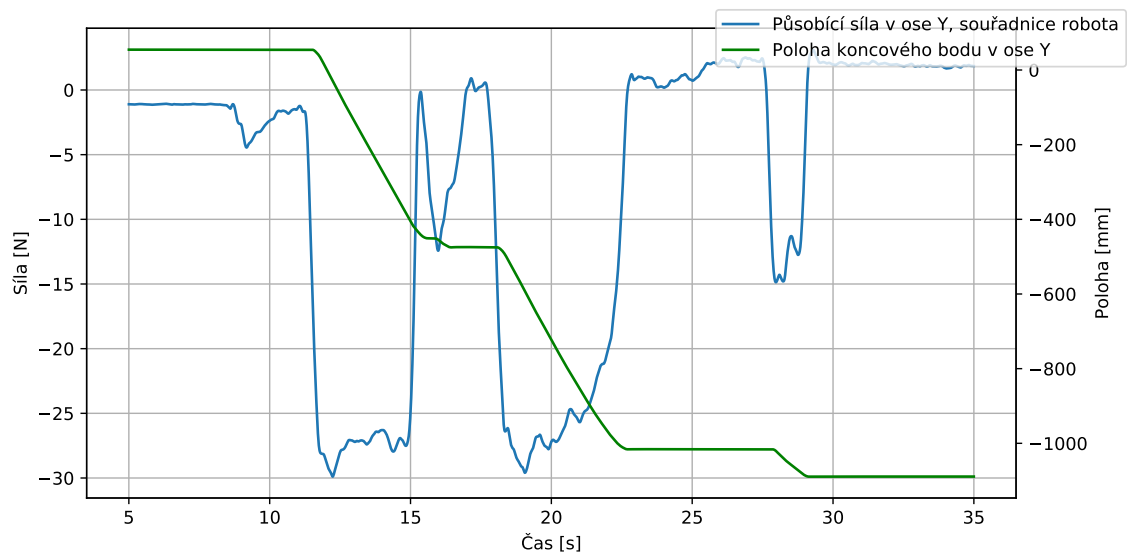
6.3 Ruční navádění

Závislosti poloh jednotlivých os na silách, které na ně působí, jsou k nalezení v obr. 6.23, 6.24 a 6.25. Z těchto závislostí je zřetelné, že polohy se mění jen při překročení prahové síly 10 N, jak je popsáno v sekci 5.3.

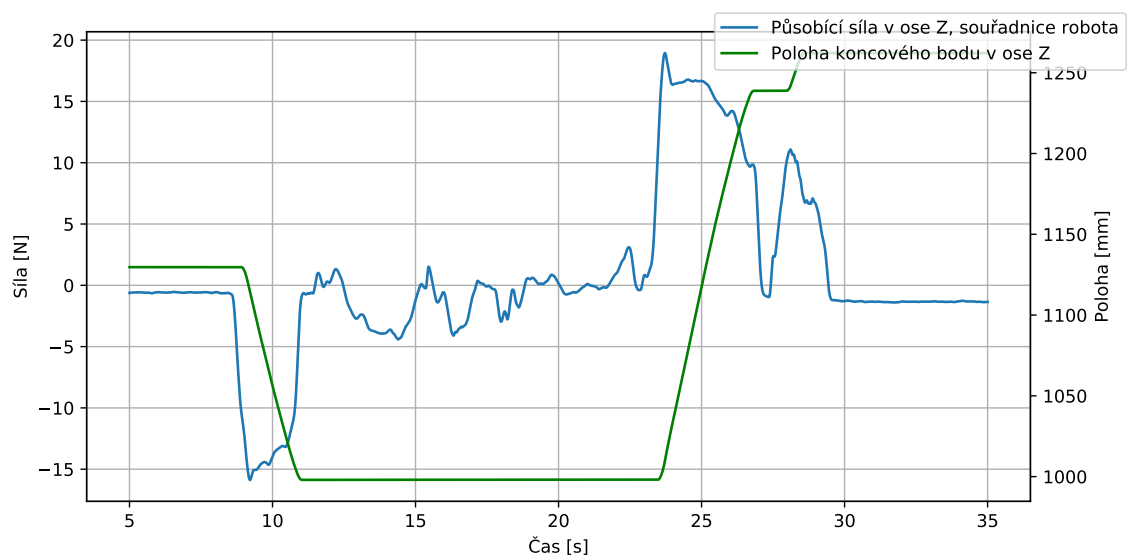
Pro ověření funkčnosti navádění má větší výpovědní hodnotu video zachycující ruční působení sil a reakci robota. Toto video je k nalezení na přiloženém datovém nosiči.



Obr. 6.23: Závislost polohy na působící síle v ose X při režimu ručního navádění.



Obr. 6.24: Závislost polohy na působící síle v ose Y při režimu ručního navádění.



Obr. 6.25: Závislost polohy na působící síle v ose Z při režimu ručního navádění.

7 Závěr

V kapitole 1 byly představeny kooperativní roboty. Hlavní částí kapitoly jsou druhy kooperace, které kooperativní roboty mohou vykonávat, a jejich požadavky na hardwarové vybavení robotů.

V kapitole 2 jsou popsány senzory síly a točivého momentu – obzvláště pak odporové tenzometry. Dále jsou v této kapitole rozebrány různé možnosti umístění senzorů – umístění před efektor, u každého kloubu robota a kombinace obou.

Kapitola 3 se zabývá stručným popisem řídicího systému TG Motion, který je využit pro řízení robotu popsaném v následující kapitole.

Kapitola 4 je věnována popisu robotu od společnosti TG Drives, který byl testovací platformou pro všechny vyvíjené metody a algoritmy. Důležitou částí této kapitoly je rozbor použitého senzoru síly a momentu.

Daný senzor je zatížen šumem v ose Z a dále je nemožné trvale nastavit vzorkovací frekvenci 500 Hz udávanou výrobcem. Proto je senzor nevhodný pro použití v aplikacích s požadavky na vysokou přesnost působící síly společně s vysokou rychlostí pohybů. Při povolení požadavků buď na přesnost nebo rychlost je senzor možné použít.

V kapitole 5 je podrobně popsáno zpracování výstupních dat senzoru, které jsou ovlivněné offsetem, gravitačním působením efektoru robota a nepřesným umístěním senzoru. Dále byl navržen a implementován adaptivní algoritmus umožňující působení žádanou silou. Algoritmus se skládá z P regulátoru rychlosti, který reguluje na základě měřené síly, a generátoru poloh, jenž zajišťuje plynulost pohybů.

Následně byl navržen a implementován algoritmus pro ruční navádění robotického manipulátoru. Ten pracuje obdobně jako algoritmus pro regulaci na žádanou sílu s tím, že se reguluje na nulovou žádanou sílu. Pro vyvarování se samovolným pohybům je zavedené mrtvé pásmo ve zpětné vazbě.

Kapitola 6 je věnována ověřování funkčnosti navržených algoritmů. Navržený algoritmus pro řízení síly ve všech případech znatelně zlepšil přesnost a stálost působící síly. Pro testovací aplikace, při kterých se kreslilo na podložce, která byla zvlněná nebo nerovně uložená, bylo využití daného řídicího algoritmu nezbytně nutné pro úspěšné splnění úlohy.

Ruční navádění je funkční, což je podloženo přiloženým videem. Pro hrubé pohyby je navádění i uživatelsky přívětivé. Pro jemné pohyby by bylo vhodné robot vybavit potenciometrem, který by ovládal zesílení silového regulátoru a tím usnadnil navádění s požadavky na vysokou přesnost.

Pro zvýšení bezpečnosti během ručních pohybů by bylo vhodné robot vybavit přenosným povolovacím tlačítkem.

Literatura

- [1] BÉLANGER-BARRETTE, Mathieu. What Does Collaborative Robot Mean? [online]. 2015, Aug 19 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean>
- [2] DAVISON, Pat. Safety Standards and Collaborative Robots. In: Robotics [online]. Robotic Industries Association [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.robotics.org/userAssets/riaUploads/file/6-Pat.pdf>
- [3] VACULÍKOVÁ, Eva. Robot nebo kobot: V čem se liší?. Talentica [online]. 2018, 5. 4. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.talentica.cz/robot-nebo-kobot/>
- [4] VEGARD NERSETH, Per. Introducing YuMi, the world's first truly collaborative robot. ABB Conversations [online]. ABB, 2015 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.abb-conversations.com/2015/04/introducing-yumi-the-worlds-first-truly-collaborative-robot/>
- [5] BEAUPRE, Mike. Collaborative Robot Technology and Applications. Robotics.org [online]. Robotic Industries Association [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: https://www.robotics.org/userAssets/riaUploads/file/4-KUKA_Beaupre.pdf
- [6] TG Motion: Univerzální řídicí systém na osobním počítači (Katalogový list). Brno, 2017. Dostupné také z: https://www.tgdrives.cz/fileadmin/user_upload/download/TG_Drives_2015_TG_Motion_CZ.pdf
- [7] TG Motion: Skupina typu SERVO, návod k obsluze. Brno, 2017. Dostupné také z: https://www.tgdrives.cz/fileadmin/user_upload/download-TGMotion/TG-Motion-4-Skupina-Servo.pdf
- [8] 6-Axis F/T Sensor: Hex-H. Optoforce, 2017.
- [9] Optoforce. Optoforce [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <https://optoforce.com/>
- [10] BORDAUD Nicolas, GANNE Gabriel. rtfiler. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://github.com/nbourdau/rtfilter>
- [11] PORR Bernd, IIR1 – Realtime C++ filter library. [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://github.com/berndporr/iir1>

- [12] Scipy Developers. SciPy. [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://www.scipy.org>
- [13] Binglong Wu, Daokui Qu, F. Xu, Jilai Song and Jintao Hu, "A multi-parameter overall identification method used for industrial robot force signal processing,"Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shenyang, 2014, pp. 2437-2441. doi: 10.1109/W-CICA.2014.7053104. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7053104&isnumber=7052676>
- [14] CAS USA. CAS EC, Owner's Manual. [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: http://www.cas-usa.com/cas-usa.com/media/EC_OM%20v80130.pdf

Seznam symbolů, veličin a zkratek

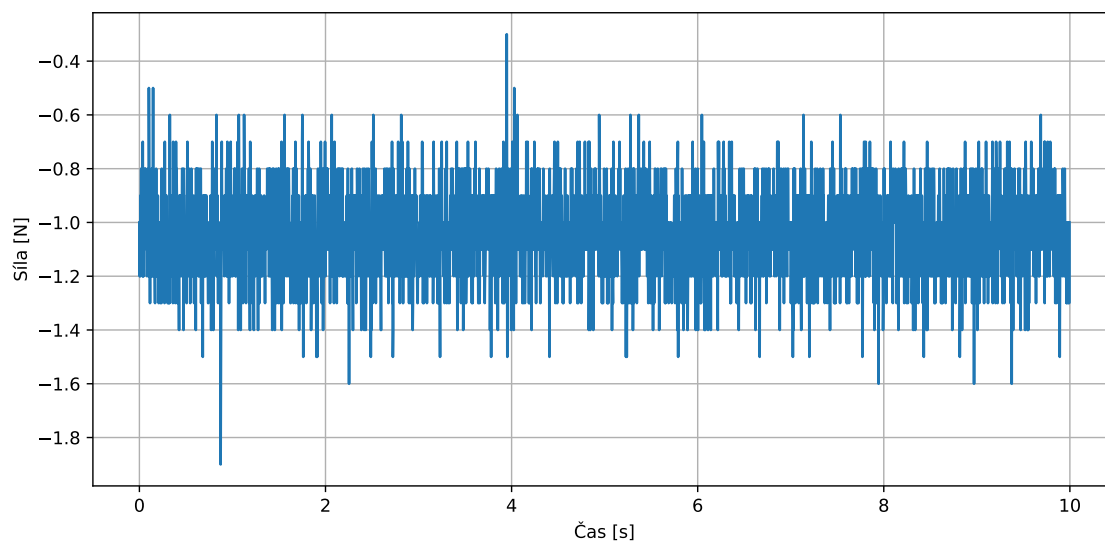
PLC	Programovatelný logický automat – Programmable Logic Controller
CNC	Počítačové numerické řízení – Computer Numerical Control
RTOS	Operační systém reálného času – Real Time Operating System
API	Aplikační programovací rozhraní – Application Programming Interface
Cobot	Kooperativní robot – Collaborative robot
DOF	Stupně volnosti – Degrees of freedom
IIR	Nekonečná impulzní odezva – Infinite impulse response

Seznam příloh

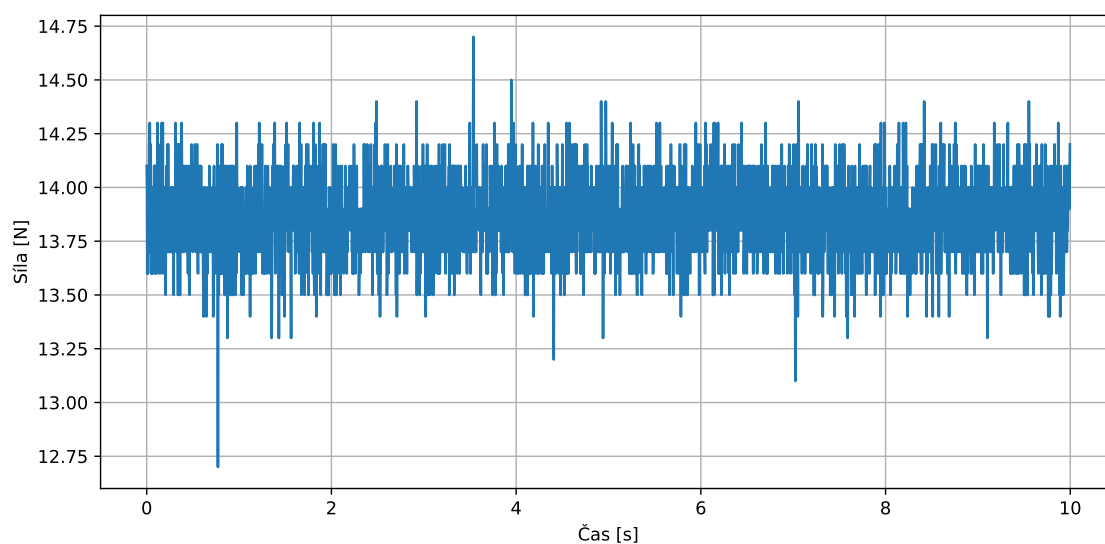
A	Průběhy veličin	74
A.1	Nefiltrované detaily vstupních signálů	74
A.2	Filtrované průběhy síly	75
A.2.1	Dlouhodobé	75
A.2.2	Krátkodobé	76
A.3	Spektrum silových signálů	77
B	Testovací programy	79
B.1	Kreslení bez regulace	79
B.2	Kreslení s regulací – požadovaná síla 1N	80
C	Obsah přiloženého CD	81

A Průběhy veličin

A.1 Nefiltrované detaily vstupních signálů



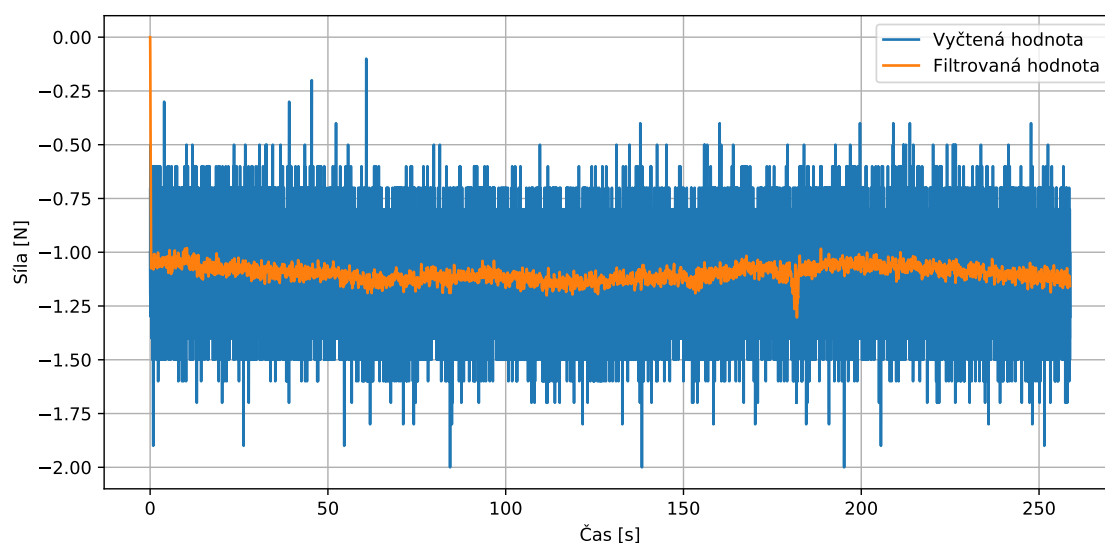
Obr. A.1: Detail průběhu hodnoty síly na ose X, bez zatížení snímače.



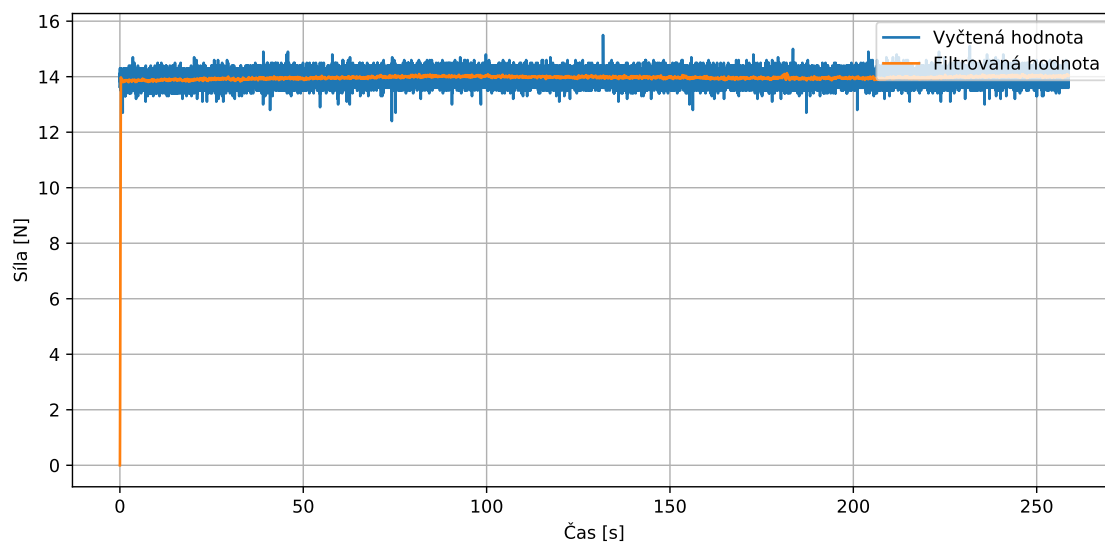
Obr. A.2: Detail průběhu hodnoty síly na ose Y, bez zatížení snímače.

A.2 Filtrované průběhy síly

A.2.1 Dlouhodobé

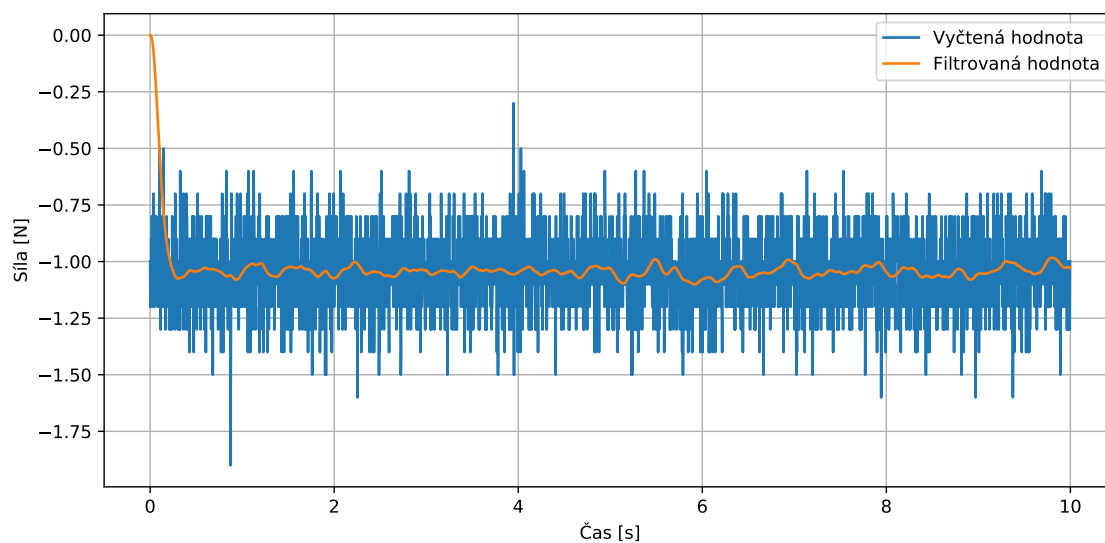


Obr. A.3: Srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose X, bez zatížení snímače.

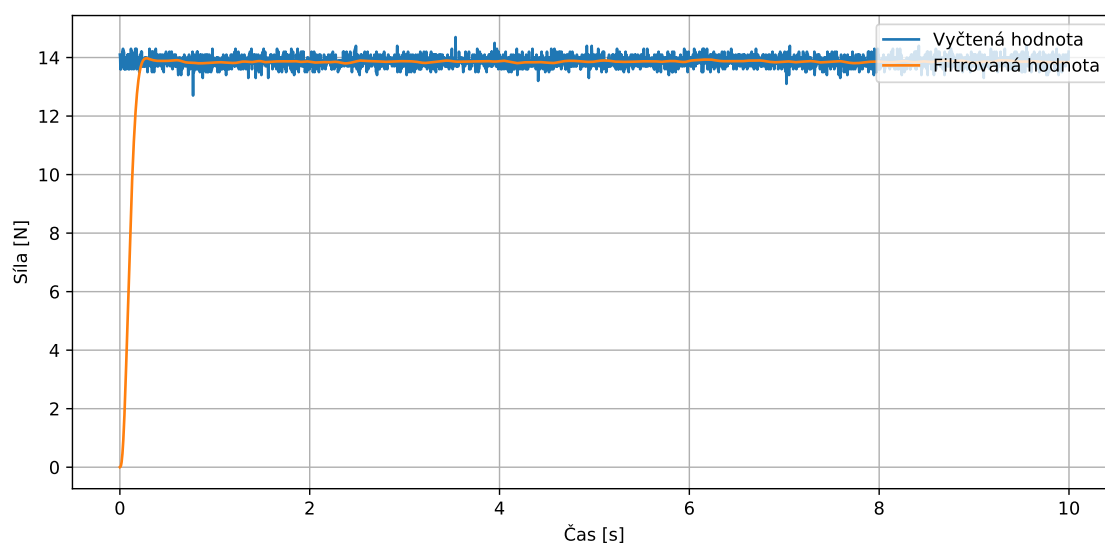


Obr. A.4: Srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose Y, bez zatížení snímače.

A.2.2 Krátkodobé

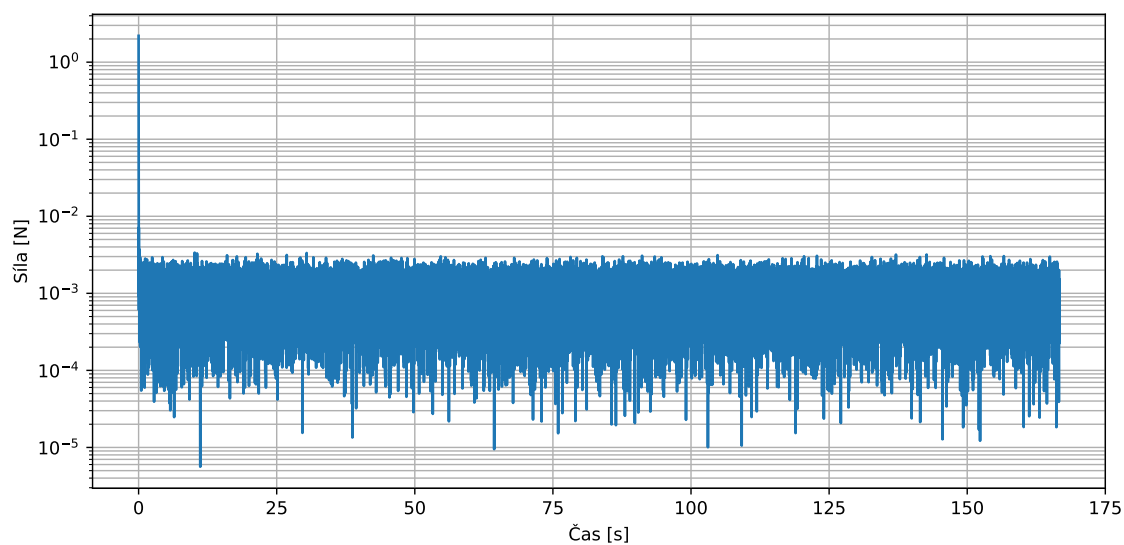


Obr. A.5: Detail srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose X, bez zatížení snímače.

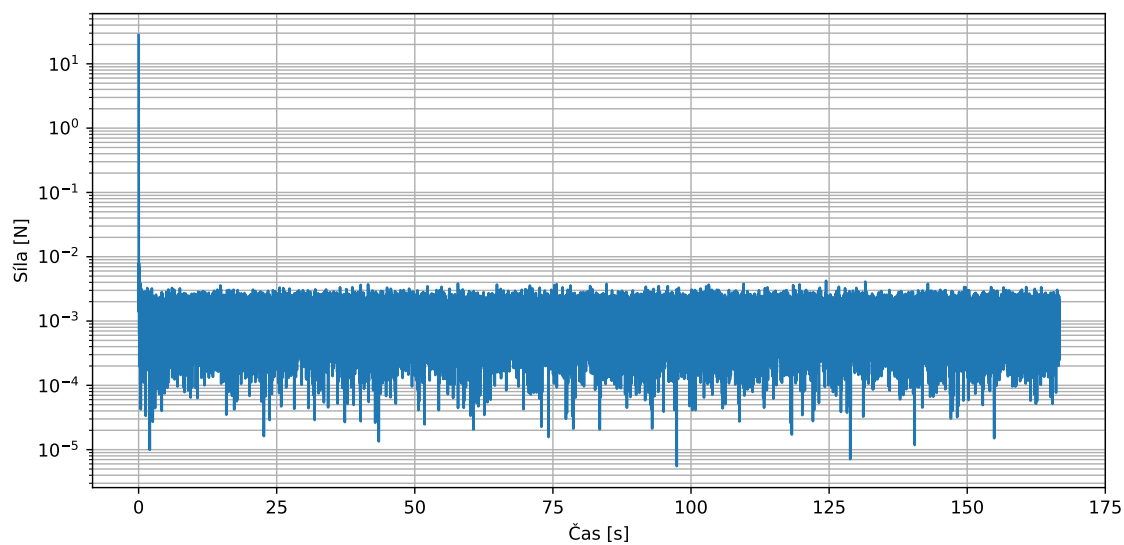


Obr. A.6: Detail srovnání vyčítaných a filtrovaných hodnot síly na ose Y, bez zatížení snímače.

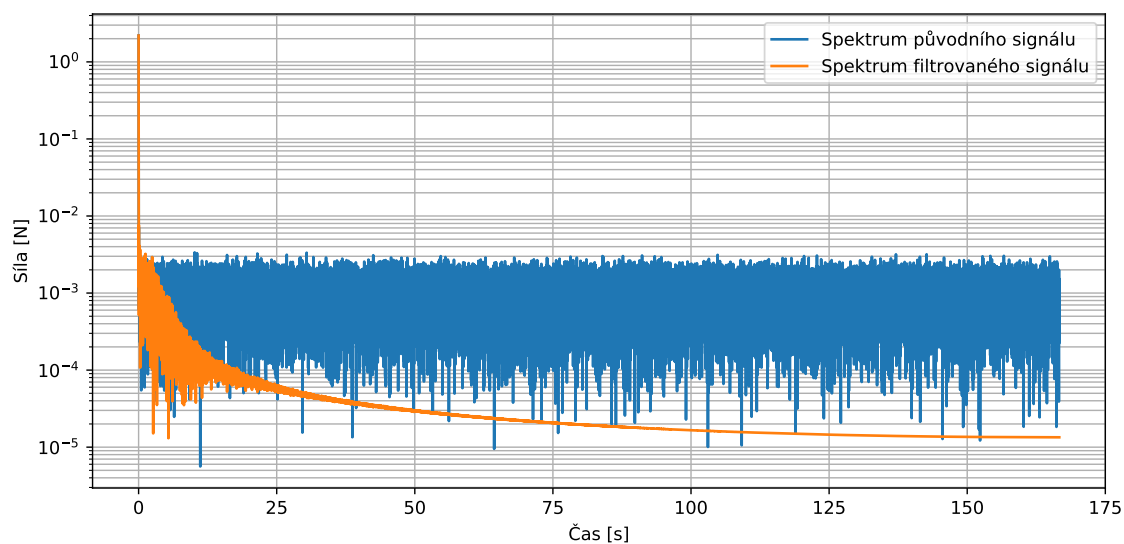
A.3 Spektrum silových signálů



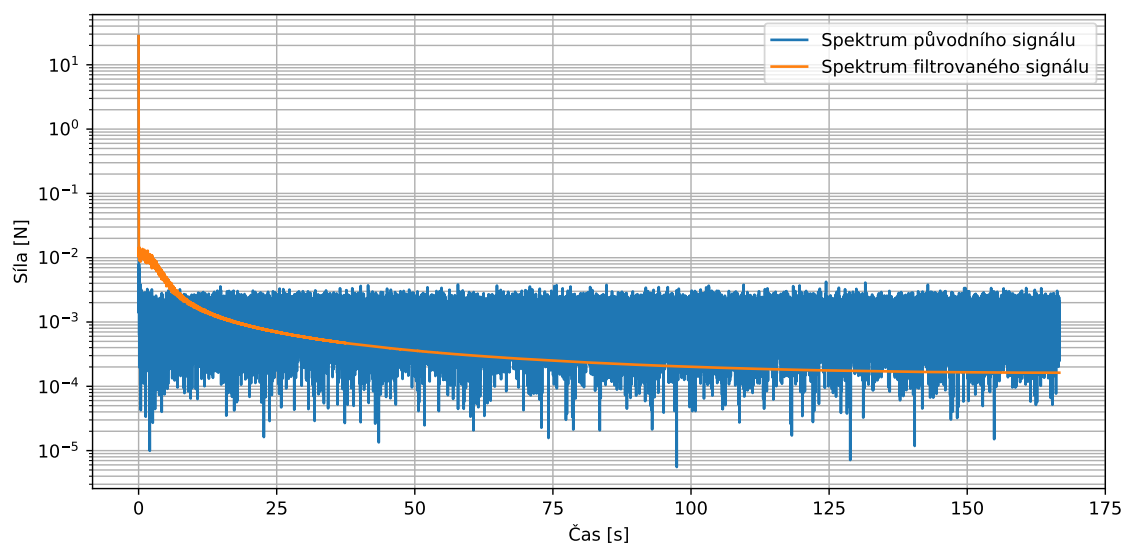
Obr. A.7: Spektrum silového signálu snímače na ose X.



Obr. A.8: Spektrum silového signálu snímače na ose Y.



Obr. A.9: Srovnání spekter původních a filtrovaných silových signálů snímače na ose X.



Obr. A.10: Srovnání spekter původních a filtrovaných silových signálů snímače na ose Y.

B Testovací programy

B.1 Kreslení bez regulace

```
G91    // Souřadnice jsou zadávány relativně

M120   // Vynulování vyčítaných sil
M150 Z 15    //Omezení maximálních působících sil
M160 Z -15   //Omezení minimálních působících sil

G1 Z -10
G1 X 50 Y 0
G3 X 10 Y 10 R 10
G1 X 0 Y 50
G3 X -10 Y 10 R 10
G1 X -50 Y 0
G3 X -10 Y -10 R 10
G1 X 0 Y -50
G3 X 10 Y -10 R 10
G1 Z 10

M155   // Vypnutí omezení maximalních působících sil
M165   // Vypnutí omezení minimálních působících sil
M125   // Vypnutí offsetování vyčítaných silových hodnot

M2 // Ukončení programu
```

B.2 Kreslení s regulací – požadovaná síla 1N

G91 // Souřadnice jsou zadávány relativně

M120 // Vynulování vyčítaných sil

M150 Z 15 //Omezení maximálních působících sil

M160 Z -15 //Omezení minimálních působících sil

G1 Z -7

M100 Z 1 G 0.05 S 0.15 K 1.0 //Působení silou 1N

M80 Z 1 K 1.0 //Aktivování působení silou 1N

G1 X 50 Y 0

G3 X 10 Y 10 R 10

G1 X 0 Y 50

G3 X -10 Y 10 R 10

G1 X -50 Y 0

G3 X -10 Y -10 R 10

G1 X 0 Y -50

G3 X 10 Y -10 R 10

M105 //Vypnutí působení silou 1N

G1 Z 10

M155 // Vypnutí omezení maximalních působících sil

M165 // Vypnutí omezení minimálních působících sil

M125 // Vypnutí offsetování vyčítaných silových hodnot

M2 // Ukončení programu

C Obsah přiloženého CD

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── Kalibrace ..... Složka se skripty pro kalibraci snímače
├── PLC ..... Složka s realtime knihovnama pro adaptivní řízení
├── SerialScale.....adresář s aplikací pro vyčítání dat z váhy CAS EC
├── ServisniAplikace.....adresář s aplikací pro nastavení filtrů
├── TestovaciAplikace ..... adresář se záznamem dat z ověřovacího měření
│   ├── RucniPohyby
│   └── Kresleni
```